

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE JUNTAS
SECAS PRODUZIDAS COM CONCRETO DE AGREGADOS
GRAÚDOS RECICLADOS

JEDSON BATISTA SOUSA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JANEIRO DE 2022

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE JUNTAS
SECAS PRODUZIDAS COM CONCRETO DE AGREGADOS
GRAÚDOS RECICLADOS

JEDSON BATISTA SOUSA

“Dissertação 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 Mestre
em Engenharia Civil”.

Orientador: Sergio Luis González Garcia

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JANEIRO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S725 Sousa, Jedson Batista.

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE JUNTAS SECAS PRODUZIDAS COM CONCRETO DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS / Jedson Batista Sousa. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2022.

175 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2022.

Orientador: Sergio Luis González Garcia.

1. juntas secas. 2. concreto de agregados graúdos reciclados. 3. *push-off*. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE JUNTAS
SECAS PRODUZIDAS COM CONCRETO DE AGREGADOS
GRAÚDOS RECICLADOS

JEDSON BATISTA SOUSA

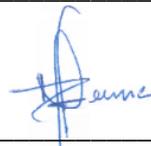
“Dissertação apresentada ao PPGEC -
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil”.

Data da defesa: 28/01/2022

Comissão examinadora:



Prof. Gustavo Savaris, D. Sc. - UTFPR



Prof. Maurício de Pina Ferreira, D. Sc. - UFPA



Prof. Rancés Castillo Lara, D. Sc. - LECIV-UENF



Prof. Sergio Luis González Garcia, D. Sc. - LECIV-UENF

Orientador

“Matemática é a linguagem do universo. Portanto, quanto mais equações você conhece, mais pode conversar com o cosmos.”

Neil deGrasse Tyson

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e minha irmã, por todo apoio, ajuda e incentivo em todas as etapas desse processo. Me recordo daqueles dias extraordinários de fevereiro de 2021, onde me encontrava num momento de grande sobrecarga mental e cansaço físico, e, num ato de extrema compaixão, vieram ajudar nos meus afazeres do laboratório. De repente, todo aquele esforço físico de dobrar ferragem e quebrar vigas, para produção de agregado reciclado, se tornou parte de um processo divertido e descontraído. Foi um período inesquecível. Toda dor muscular foi reduzida pela ajuda imensurável de meu pai Edson, toda solidão de morar sozinho e não tê-los por perto foi sanada pelo companheirismo de minha irmã Jessica, e toda pressão psicológica foi deixada de lado perante as palavras carinhosas de minha mãe Maria. A vocês tenho minha eterna gratidão e agradecimento.

Agradeço também ao meu orientador professor Sergio Luis, pelos grandiosos ensinamentos. De todas as pessoas que passaram e passarão pela minha vida, com certeza ele estará dentre as mais importantes. Considero um ato divino passar ensinamentos de um indivíduo ao outro e ele realizou com extrema maestria.

Agradeço minha orientadora de monografia Danielle Malvaris, quem inicialmente me apresentou o mundo acadêmico e me motivou a fazer esse mestrado.

Agradeço à FAPERJ pelo apoio financeiro, à instituição UENF e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade e incentivo à pesquisa no nosso país.

Agradeço aos inúmeros colegas e amigos que fiz nesse período, em especial ao Renan Novaes, Herbert Sangi e Juliana Trindade, por toda ajuda e risadas que compartilhamos nesse tempo.

A todos os demais, amigos e familiares, que de alguma forma contribuíram para essa conquista.

Sumário

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Geral	3
1.2.2. Específicos	3
1.3. Justificativas	4
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. CONCRETO COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS	6
2.1.1. Definição	6
2.1.2. Propriedades dos agregados reciclados	6
2.1.3. Propriedades do concreto devido os agregados reciclados	8
2.2. TEORIA DO ATRITO-CISALHAMENTO	10
2.2.1. Definição	10
2.2.2. A teoria inicial do atrito-cisalhamento proposta por Birkeland P. e Birkeland H.	12
2.2.3. Cisalhamento em concretos com agregados reciclados	15
2.3. JUNTAS SECAS DE CONCRETO	16
2.3.1. Introdução	16
2.3.2. Mecanismo de resistência das juntas secas	18
2.3.3. Mecanismo de falha das juntas	25
2.3.4. Recomendações normativas	28
2.3.4.1. AASHTO (1999)	28
2.3.4.2. ATEP (1996)	29
2.3.4.3. ACI 318-19 (2019)	29
2.3.4.4. EUROCODE 2 (2004)	29
2.3.4.5. ABNT NBR 6118:2014 (2014)	30
2.3.5. Pesquisas relacionadas	30
2.3.5.1. BUYUKOZTURK et al. (1990)	31
2.3.5.2. ROMBACH e SPECKER (2002)	32
2.3.5.3. TURMO et al. (2006)	32
2.3.5.4. YANG et al. (2013)	33
2.3.5.5. ALCALDE et al. (2013)	34
2.3.5.6. SHAMASS et al. (2015)	35
2.3.5.7. JIANG et al. (2015)	37
2.3.5.8. KASSEM et al. (2017)	39

2.3.5.9.	LIU et al. (2019)	40
2.3.5.10.	Considerações sobre os trabalhos pesquisados	43
CAPÍTULO III - PROGRAMA EXPERIMENTAL		45
3.1.	Introdução	45
a)	Número de dentes de cisalhamento	45
b)	Tensão de confinamento	46
3.2.	Materiais	46
3.2.1.	Água	46
3.2.2.	Cimento	46
3.2.3.	Areia	46
3.2.4.	Agregados graúdos	47
3.2.5.	Armaduras de aço	47
3.3.	Produção dos agregados reciclados	47
3.3.1.	Coleta do concreto a ser reciclado	47
3.3.2.	Britagem	47
3.3.3.	Peneiramento	48
3.3.4.	Armazenagem	49
3.4.	Caracterização dos agregados	49
3.4.1.	Composição granulométrica	49
3.4.2.	Massa específica real, massa específica unitária e massa específica aparente	50
3.4.3.	Absorção de água	51
3.4.4.	Ensaio de abrasão Micro-Deval	51
3.4.5.	Quantidade de argamassa aderida ao agregado graúdo reciclado	51
3.5.	Dosagem dos concretos	52
3.6.	Confecção das Fôrmas	53
3.7.	Características dos corpos-de-prova	53
3.8.	Produção dos corpos-de-prova	56
3.9.	Caracterização do concreto com agregados graúdos reciclados no estado endurecido	58
3.9.1.	Resistência à compressão	58
3.9.2.	Resistência à tração por compressão diametral	59
3.9.3.	Módulo de elasticidade	59
3.9.4.	Densidade, porosidade e absorção de água	60
3.9.5.	Microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados	60
3.10.	Instrumentação e procedimentos de ensaios <i>push-off</i>	61

3.11.	Análise de deslocamentos via Correlação de Imagem Digital – CID	65
3.12.	Utilização do <i>software GOM Correlate 2020</i> na análise CID	67
3.13.	Fluxograma do programa experimental	72
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES		73
4.1.	Caracterização do aço do sistema de confinamento	73
4.2.	Caracterização dos agregados graúdos reciclados e agregados miúdos	74
4.2.1.	Perda de material pelo processo de britagem do resíduo para produção de agregado reciclado	74
4.2.2.	Composição granulométrica	74
4.2.3.	Massa específica real, unitária e aparente	75
4.2.4.	Absorção de água dos agregados graúdos reciclados	76
4.2.5.	Ensaio de Abrasão Micro-Deval	76
4.2.6.	Quantidade de argamassa aderida ao agregado graúdo reciclado	77
4.3.	Caracterização do concreto com agregados graúdos reciclados	77
4.3.1.	Resistência à compressão	77
4.3.2.	Resistência à tração por compressão diametral	78
4.3.3.	Módulo de elasticidade	79
4.3.4.	Densidade, porosidade e absorção de água do concreto	79
4.3.5.	Microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados	79
4.4.	Ruptura das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados	82
4.4.1.	Juntas secas lisas	82
4.4.1.1.	Influência da tensão de confinamento	83
4.4.1.2.	Análise da tensão de cisalhamento normalizada	85
4.4.1.3.	Coefficiente de fricção	89
4.4.2.	Juntas secas com um dente	89
4.4.2.1.	Influência da tensão de confinamento	90
4.4.2.2.	Resistência residual	92
4.4.2.3.	Análise da tensão de cisalhamento normalizada	93
4.4.2.4.	Análise da ruptura e cinética da fissuração	98
4.4.3.	Juntas secas com três dentes	107
4.4.3.1.	Influência da tensão de confinamento	109
4.4.3.2.	Resistência residual	111
4.4.3.3.	Análise da tensão de cisalhamento normalizada	112
4.4.3.4.	Análise da ruptura e cinética da fissuração	117
4.4.4.	Comparação entre as juntas secas com um e três dentes	127
4.4.5.	Comparação dos resultados experimentais com normas e equações propostas por pesquisadores	

CONCLUSÕES _____ **141**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____ **143**

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Seção transversal de uma aduela protendida; Fonte: Adaptado de FHWA (2013).</i>	1
<i>Figura 2 - Detalhe dos dentes de cisalhamento.</i>	2
<i>Figura 3 – Representação esquemática da zona de transição pasta-agregado no concreto; Fonte: adaptado de ARAÚJO (2015).</i>	7
<i>Figura 4 - Representação esquemática da zona de transição pasta-agregado reciclado no concreto; Fonte: adaptado de ARAÚJO (2015).</i>	8
<i>Figura 5 - Modelo serra-de-dentes; Fonte SANTOS e JÚLIO (2012).</i>	11
<i>Figura 6 - Mecanismo de transferência de carga; Fonte: (ZILCH; REINECKE, 2000).</i>	12
<i>Figura 7 - Peça de concreto submetida à tensões cisalhantes e tensões de compressão; Fonte: BIRKELAND; BIRKELAND (1966).</i>	13
<i>Figura 8 - Hipótese da teoria atrito-cisalhamento; Fonte: Adaptado de BIRKELAND; BIRKELAND (1966).</i>	13
<i>Figura 9 - Esquema de fissuração de concretos com resistência normal e de alta resistência; Fonte: Adaptado de ALI; WHITE (1999).</i>	15
<i>Figura 10 – Aduela pré-moldada: a) seção transversal da aduela, b) detalhe de um dente de cisalhamento; Fonte: adaptado de ROMBACH; SPECKER (2002).</i>	18
<i>Figura 11 – Esquema de junta seca: a) toda a junta, b) parte lisa e c) região dos dentes de cisalhamento; Adaptado de ROMBACH; SPECKER (2002).</i>	19
<i>Figura 12 – Corpo-de-prova de junta seca lisa submetido a um ensaio push-off.</i>	19
<i>Figura 13 - Modelo serra de dente para ilustrar a rugosidade de superfícies.</i>	20
<i>Figura 14 – Corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento submetido a um ensaio push-off.</i>	21
<i>Figura 15 - Elemento infinitesimal localizado próximo ao plano de cisalhamento do dente.</i>	21
<i>Figura 16 - Círculo de Mohr descrevendo o comportamento de um elemento infinitesimal próximo ao plano de ruptura do dente; Fonte: Adaptado de LIU et al. (2019).</i>	22
<i>Figura 17 - Comparação entre os círculos de Mohr de elementos infinitesimais com e sem a presença de tensão confinante; Fonte: Adaptado de ROBERTS et al. (1993).</i>	23
<i>Figura 18 - Dentes de cisalhamento com diferentes inclinações.</i>	24
<i>Figura 19 - Abertura de juntas entre aduelas: a) devido momentos positivos e b) momentos negativos; Fonte: adaptado de ROMBACH; SPECKER (2002).</i>	26
<i>Figura 20 - Padrões de fissuras obtidos a partir da análise numérica de juntas com 1 e 3 dentes; Fonte: ALCALDE et al. (2013).</i>	27
<i>Figura 21 - Ruptura das juntas de um e de três dentes; Fonte: adaptado de ZHOU et al. (2005).</i>	28
<i>Figura 22 - Britador de mandíbulas de dois eixos.</i>	48
<i>Figura 23 - Armazenagem do agregado reciclado.</i>	49
<i>Figura 24 – Ensaio de granulometria dos agregados reciclados.</i>	50
<i>Figura 25 - Ensaio de massa específica real e massa específica unitária dos agregados reciclados.</i>	50
<i>Figura 26 - Equipamento de ensaio de abrasão Micro-Deval.</i>	51
<i>Figura 27 - Ataque ácido nos agregados reciclados.</i>	52

<i>Figura 28 - Fôrmas de madeira para produção dos corpos-de-prova.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 29 - Detalhe dos corpos-de-prova de junta seca: a) lisa, b) com um dente e c) com três dentes (unidades em cm).</i>	<i>55</i>
<i>Figura 30 - Armaduras utilizadas em ambas as partes dos corpos-de-prova de juntas secas.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 31 - Primeira etapa da concretagem dos corpos-de-prova com dentes de cisalhamento.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 32 - Segunda etapa da concretagem dos corpos-de-prova com dentes de cisalhamento.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 33 – Garantia do perfeito encaixe entre os dentes de cisalhamento.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 34 - Desmoldagem e separação das duas partes da junta seca com dentes de cisalhamento.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 35 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral por compressão diametral.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 36 - Ensaio para a determinação do módulo de elasticidade do concreto.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 37 - Ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 38 - Regiões analisadas no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 39 - Barras de aço rosqueadas utilizadas no sistema de confinamento (unidades em cm).</i>	<i>62</i>
<i>Figura 40 - Barras de aço rosqueadas instrumentadas com strain gauges.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 41 - Porcas de aço compatíveis com as barras de aço de 15 mm utilizadas no sistema de confinamento.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 42 - Chapas de aço utilizadas no sistema de confinamento (unidades em cm).</i>	<i>63</i>
<i>Figura 43 - Esquema do sistema de aplicação da tensão de confinamento.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 44 - Ilustração do sistema de confinamento instalado nos corpos-de-prova de junta seca: a) lisa, b) com um dente e c) com três dentes.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 45 - Sistema de confinamento instalado em um corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 46 - Ensaio push-off das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados em conjunto com a análise CID.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 47 - Interface inicial de análise do GOM Correlate 2020.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 48 - Componente de Superfície criado na análise de um corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 49 - Possibilidades de análises no Componente de Superfície.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 50 - Ferramentas de criação presentes para as análises no GOM Correlate 2020.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 51 - Disposição dos pontos em cada lado do plano de cisalhamento em uma análise de junta seca com um dente.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 52 - Utilização da ferramenta "Distância" no GOM Correlate 2020.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 53 - Distância vertical entre pares de pontos em certo instante de um ensaio push-off de junta seca de um dente.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 54 - Distância relativa entre pares de pontos para análise da abertura de fissuras.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 55 - Ensaio de tração das barras rosqueadas.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 56 - Curva granulométrica dos agregados graúdos reciclados.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 57 – Agregado reciclado: a) agregado reciclado antes do ensaio de abrasão e b) após o ensaio.</i>	<i>77</i>

<i>Figura 58 - Região 1 aumentada 100x no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 59 - Região 2 aumentada 100x no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 60 - Região 3 aumentada 100x no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 61 - Região 4 aumentada 100x no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 62 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas lisas do grupo 1.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 63 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas lisas do grupo 2.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 64 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas lisas do grupo 3.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 65 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas lisas para a tensão de confinamento de 1 MPa.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 66 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas lisas para a tensão de confinamento de 2 MPa.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 67 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas lisas para a tensão de confinamento de 3 MPa.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 68 - Tensão de cisalhamento normalizada máxima dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas lisas.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 69 - Média dos valores da tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas lisas.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 70 – Curva média da tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento das juntas secas lisas, para as tensões de confinamento estudadas.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 71 – Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas com um dente de cisalhamento do grupo 1.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 72 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas com um dente de cisalhamento do grupo 2.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 73 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas com um dente de cisalhamento do grupo 3.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 74 – Corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento rompido.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 75 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com um dente para a tensão de confinamento de 1 MPa.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 76 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com um dente para a tensão de confinamento de 2 MPa.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 77 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com um dente para a tensão de confinamento de 3 MPa.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 78 - Tensão de cisalhamento normalizada máxima dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas com um dente de cisalhamento.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 79 - Média dos valores da tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com um dente de cisalhamento.....</i>	<i>97</i>

<i>Figura 80 – Curva média da tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento das juntas secas com um dente de cisalhamento, para as tensões de confinamento estudadas.</i>	97
<i>Figura 81 – Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-1,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	98
<i>Figura 82 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-1,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	99
<i>Figura 83 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-1-1,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	99
<i>Figura 84 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-2,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	99
<i>Figura 85 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-2,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	100
<i>Figura 86 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-3,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	100
<i>Figura 87 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-3,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	100
<i>Figura 88 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-1-3,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.</i>	101
<i>Figura 89 – Comparação entre as tensões normalizadas dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas com um dente de cisalhamento.</i>	102
<i>Figura 90 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura a 45 graus e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com um dente de cisalhamento.</i>	103
<i>Figura 91 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura de ruptura e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com um dente de cisalhamento.</i>	104
<i>Figura 92 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-1,0 de junta seca.</i>	105
<i>Figura 93 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-2,0 de junta seca.</i>	105
<i>Figura 94 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-3,0 de junta seca.</i>	105
<i>Figura 95 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-1,0 de junta seca.</i>	106
<i>Figura 96 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-2,0 de junta seca.</i>	106
<i>Figura 97 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-3,0 de junta seca.</i>	106
<i>Figura 98 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR3-1-1,0 de junta seca.</i>	107
<i>Figura 99 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR3-1-3,0 de junta seca.</i>	107
<i>Figura 100 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas com três dentes de cisalhamento do grupo 1.</i>	109
<i>Figura 101 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas com três dentes de cisalhamento do grupo 2.</i>	110

<i>Figura 102 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas com três dentes de cisalhamento do grupo 3.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 103 – Corpo-de-prova de junta seca com três dentes de cisalhamento rompida.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 104 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes para a tensão de confinamento de 1 MPa.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 105 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes para a tensão de confinamento de 2 MPa.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 106 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes para a tensão de confinamento de 3 MPa.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 107 - Tensão de cisalhamento normalizada dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas com três dentes de cisalhamento.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 108 - Média dos valores da tensão de cisalhamento normalizada das juntas secas com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 109 - Curva média da tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento das juntas secas com três dentes de cisalhamento, para as tensões de confinamento estudadas.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 110 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-3-1,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 111 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-3-1,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 112 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-3-1,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 113 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-3-2,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 114 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-3-2,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 115 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-3-3,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 116 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-3-3,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 117 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-3-3,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>121</i>
<i>Figura 118 - Comparação entre as tensões normalizadas dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas com três dentes de cisalhamento.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 119 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura de ruptura no primeiro dente e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>123</i>
<i>Figura 120 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura de ruptura no segundo dente e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>123</i>

<i>Figura 121 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura de ruptura no terceiro dente e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 122 – Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR1-3-1,0 de junta seca.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 123 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR1-3-3,0 de junta seca.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 124 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR2-3-1,0 de junta seca.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 125 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR2-3-2,0 de junta seca.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 126 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR2-3-3,0 de junta seca.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 127 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR3-3-1,0 de junta seca.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 128 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR3-3-2,0 de junta seca.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 129 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR3-3-3,0 de junta seca.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 130 – Curvas de tensão de cisalhamento máxima normalizada versus deslizamento dos ensaios push-off das juntas secas com um dente e três dentes para as diferentes tensões de confinamento.</i>	<i>128</i>
<i>Figura 131 - Influência da tensão de confinamento na tensão de cisalhamento máxima normalizada para juntas secas com um e três dentes de cisalhamento.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 132 - Tensão de cisalhamento última normalizada obtida experimentalmente da média dos resultados experimentais das juntas secas com um dente e os previstos pela AASHTO (1999).</i>	<i>130</i>
<i>Figura 133 - Tensão de cisalhamento última normalizada obtida experimentalmente da média dos resultados experimentais das juntas secas com três dentes e os previstos pela AASHTO (1999).....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 134 - Tensão de cisalhamento máxima normalizada obtida experimentalmente da média das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente e os resultados de outros autores.</i>	<i>132</i>
<i>Figura 135 - Tensão de cisalhamento máxima normalizada obtida experimentalmente da média das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes e os resultados de outros autores.</i>	<i>133</i>
<i>Figura 136 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_c = 34,90$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.</i>	<i>137</i>
<i>Figura 137 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_c = 43,06$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.</i>	<i>137</i>

<i>Figura 138 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_c = 46,59$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 139 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_c = 34,90$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 140 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_c = 43,06$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.</i>	<i>139</i>
<i>Figura 141 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_c = 46,59$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.</i>	<i>139</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Resumo dos coeficientes de fricção considerados pelos autores, instituições e normas.</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 2 - Dosagem do concreto com agregados graúdos reciclados.</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 3 - Resumo dos corpos-de-prova.</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 4 - Informações da armadura utilizada nos corpos-de-prova de junta seca com um e três dentes de cisalhamento.</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 5 - Valor das forças necessárias em cada barra para a produção das tensões de confinamento.</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 6 - Características físicas e mecânicas das barras de aço rosqueadas.</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 7 - Deformação necessária das barras de aço rosqueadas para produção das respectivas tensões confinantes nos corpos-de-prova de juntas secas lisas e com um dente de cisalhamento.</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 8 - Deformação necessária das barras de aço rosqueadas para produção das respectivas tensões confinantes nos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 9 - Perda de material devido processo de britagem.</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 10 - Resultados do ensaio de granulometria dos agregados graúdos reciclados.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 11 - Massa específica real, unitária e aparente dos agregados.</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 12 - Resultados do ensaio de absorção de água dos agregados graúdos reciclados.</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 13 – Resultados do ensaio de abrasão Micro-Deval.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 14 - Resultados do ensaio de quantificação da argamassa aderida.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 15 - Resistência à compressão dos concretos utilizados na confecção das juntas secas.</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 16 - Resistência à tração indireta dos concretos utilizados na confecção das juntas secas.</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 17 - Módulo de elasticidade dos concretos.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 18 - Resultados do ensaio de absorção de água, índice de vazios e densidade do concreto.</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 19 - Parâmetro Ra da região 1.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 20 - Parâmetro Ra da região 2.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 21 - Parâmetro Ra da região 3.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 22 - Parâmetro Ra da região 4.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 23 - Resultados dos ensaios de ruptura das juntas secas lisas.</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 24 - Percentual de aumento da carga de ruptura devido ao aumento da tensão de confinamento nos corpos-de-prova de juntas secas lisas.</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 25 - Parâmetros estatísticos da tensão de cisalhamento normalizada das juntas secas lisas.</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 26 - Coeficiente de fricção das juntas secas lisas.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 27 - Resultados dos ensaios de ruptura das juntas secas com um dente de cisalhamento.</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 28 - Percentual de aumento da carga de ruptura devido ao aumento da tensão de confinamento nos corpos-de-prova de juntas secas com um dente de cisalhamento.</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 29 - Relação entre a resistência residual e de ruptura das juntas secas com um dente de cisalhamento.</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 30 - Deslizamentos na ruptura dos corpos-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabela 31 – Parâmetros estatísticos da tensão de cisalhamento normalizada das juntas secas com um dente de cisalhamento.</i>	<i>96</i>

<i>Tabela 32 - Carga de surgimento da fissura inclinada a 45 graus e da fissura de ruptura nos corpos-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento e seus respectivos deslizamentos.</i>	<i>101</i>
<i>Tabela 33 - Carga de surgimento da fissura inclinada a 45 graus e da fissura vertical nos corpos-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento e suas respectivas relações com a carga de ruptura do dente.</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 34 - Resultados dos ensaios de ruptura das juntas secas com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 35 - Percentual de aumento da carga de ruptura devido ao aumento da tensão de confinamento nos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes de cisalhamento.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 36 - Relação entre a resistência residual e de ruptura das juntas secas com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 37 - Deslizamentos na ruptura dos corpos-de-prova de junta seca com três dentes de cisalhamento. ...</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 38 - Parâmetros estatísticos da tensão de cisalhamento normalizada das juntas secas com três dentes de cisalhamento.</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 39 - Carga de surgimento da fissura de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente nos corpos-de-prova de junta seca com três dentes de cisalhamento e seus respectivos deslizamentos.</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 40 – Tensão de cisalhamento normalizada de surgimento da fissura de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente nos corpos-de-prova de junta seca com três dentes de cisalhamento.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 41 - Percentual do aumento da tensão de cisalhamento máxima normalizada devido ao aumento da tensão de confinamento nos corpos-de-prova de juntas secas com um e três dentes de cisalhamento.</i>	<i>129</i>
<i>Tabela 42 - Percentual do aumento da tensão de cisalhamento máxima normalizada devido ao aumento de um para três dentes de cisalhamento nos corpos-de-prova de juntas secas.</i>	<i>130</i>
<i>Tabela 43 - Diferença entre os valores previstos pela equação da AASHTO (1999) para a tensão de cisalhamento máxima normalizada das juntas secas com um dente de cisalhamento.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabela 44 - Percentual de diferença entre os valores previstos pela equação da AASHTO (1999) para a resistência das juntas secas com três dentes de cisalhamento em termos de tensão de cisalhamento normalizada.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabela 45 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_c = 34,90$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabela 46 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_c = 43,06$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabela 47 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_c = 46,59$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabela 48 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_c = 34,90$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.....</i>	<i>135</i>

<i>Tabela 49 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_c = 43,06$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabela 50 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_c = 46,59$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabela 51 - Média dos valores da relação entre a carga experimental das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e a carga prevista pelas equações da literatura para cada tensão confinante.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabela 52 - Média dos valores da relação entre a carga experimental das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e a carga prevista pelas equações da literatura para cada tensão confinante.....</i>	<i>140</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_g	área bruta da seção transversal da peça
A_j	área total de cisalhamento da junta seca
A_k	área de cisalhamento da seção do dente da junta seca
A_s	área de aço
A_{sm}	área de cisalhamento da seção lisa da junta seca
A_{vf}	área de armadura que atravessa a interface de cisalhamento
$D_{fr,1}$	deslizamento no momento da aparição da fissura no primeiro dente
$D_{fr,2}$	deslizamento no momento da aparição da fissura no segundo dente
$D_{fr,3}$	deslizamento no momento da aparição da fissura no terceiro dente
N_k	número de dentes da junta seca
V	força cisalhante
$V_{f,45}$	carga de surgimento da fissura de 45 graus
$V_{fr,1}$	carga de surgimento da fissura no primeiro dente
$V_{fr,2}$	carga de surgimento da fissura no segundo dente
$V_{fr,3}$	carga de surgimento da fissura no terceiro dente
V_{fr}	carga de surgimento da fissura de ruptura
$V_{r,10mm}$	carga residual para o deslizamento de 10 mm
$V_{r,pós}$	carga pós-pico

V_r	carga residual
V_u	força cisalhante máxima
f	fator devido ao recorte dos dentes de cisalhamento
f_c	resistência à compressão do concreto
f_{ck}	resistência à compressão característica do concreto
f_{cm}	resistência média à compressão do concreto
f_{ctd}	resistência à tração inferior do concreto
f_t	resistência à tração do concreto
f_{tm}	resistência média à tração do concreto
f_u	tensão de ruptura do aço
f_{vd}	resistência à tração do concreto SHCC.
f_y	tensão de escoamento do aço
$\varepsilon_{0,5}$	deformação do concreto à 0,5% da deformação na ruptura
ε_{30}	deformação do concreto à 30% da deformação na ruptura
ε_u	deformação de ruptura do aço
ε_y	deformação de escoamento do aço
σ	tensão de compressão
$\sigma_{0,5\%}$	tensão de compressão à 0,5% da tensão máxima
σ_1	primeira tensão principal
σ_2	segunda tensão principal
$\sigma_{30\%}$	tensão de compressão à 30% da tensão máxima
σ_n	tensão de confinamento

σ_s	tensão de tração
σ_x	tensão horizontal no elemento infinitesimal
σ_y	tensão vertical no elemento infinitesimal
τ	tensão de cisalhamento
$\tau_{n,m}$	média da tensão de cisalhamento normalizada
τ_n	tensão de cisalhamento normalizada
$\tau_{nf,45}$	tensão de cisalhamento normalizada na aparição da fissura de 45 graus
$\tau_{nfr,1}$	tensão de cisalhamento normalizada na aparição da fissura no primeiro dente
$\tau_{nfr,2}$	tensão de cisalhamento normalizada na aparição da fissura no segundo dente
$\tau_{nfr,3}$	tensão de cisalhamento normalizada na aparição da fissura no terceiro dente
τ_{nfr}	tensão de cisalhamento normalizada na aparição da fissura de ruptura
τ_u	tensão de cisalhamento última
$\tau_{un,m}$	média da tensão de cisalhamento máxima normalizada
τ_{un}	tensão de cisalhamento máxima normalizada
$\tau_{un,m}^{AASHTO}$	média da tensão de cisalhamento máxima normalizada prevista pela AASHTO
E	módulo de elasticidade do concreto com agregados graúdos reciclados
E_{ci}	módulo de elasticidade tangente inicial do concreto

R_a	parâmetro média aritmética do perfil
R_p	parâmetro altura máxima do pico do perfil
R_v	parâmetro profundidade máxima do vale do perfil
R_z	parâmetro altura máxima do perfil
R_c	parâmetro altura média do perfil
R_t	parâmetro altura total do perfil
R_q	parâmetro raiz quadrada média do desvio do perfil
δ	deslocamento
φ	ângulo de inclinação dos dentes
P	força de compressão
T	força de tração
b	espessura do corpo-de-prova
c	fator de rugosidade
d	altura do plano de cisalhamento
s	deslizamento
w	deformação vertical
μ	coeficiente de fricção
ξ	taxa de confinamento
ρ	taxa de armadura

RESUMO

Juntas secas de concreto são ferramentas que possibilitam a união de elementos estruturais. Uma de suas aplicações são nas chamadas pontes segmentadas protendidas, cuja função é unir suas aduelas pré-moldadas. A resistência ao cisalhamento dessas juntas se dá devido ao travamento mecânico de saliências de concreto, chamadas de dentes de cisalhamento. A tensão de confinamento aplicada no plano de cisalhamento e o concreto utilizado nessas juntas são parâmetros fundamentais para sua resistência. Nos dias atuais, a indústria da construção civil possui um grande impacto negativo no meio ambiente, devido principalmente à geração de resíduos de construção e demolição. Um dos métodos para reduzir esse impacto é a reutilização desses resíduos para produção de agregados reciclados para concretos. O concreto produzido com agregados reciclados demonstra ser um material menos resistente, com características diferentes do concreto convencional, grande parte devido à presença de argamassa aderida ao agregado reciclado. O objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento ao cisalhamento de juntas secas quando produzidas com concreto de agregados graúdos reciclados. Para isso foram produzidos 27 corpos-de-prova do tipo *push-off* de junta seca com nenhum, um e três dentes, submetidos à tensões de confinamento de 1, 2 e 3 MPa. O concreto foi produzido utilizando um teor de substituição de 100% dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados. Os resultados mostraram que as juntas secas produzidas com concreto de agregados graúdos reciclados apresentaram comportamento semelhantes às de concreto convencional com relação à cinética de fissuração e resistência pós ruptura, porém com valores de resistência ao cisalhamento reduzidos.

Palavras-chave: juntas secas, concreto de agregados graúdos reciclados, *push-off*.

ABSTRACT

Dry concrete joints are tools that make it possible to join structural elements. One of their applications is in the so-called prestressed segmental bridges, whose function is to join their precast staves. The shear strength of these joints is due to the mechanical locking of concrete protrusions, called shear teeth. The confining stress applied in the shear plane and the concrete used in these joints are fundamental parameters for their resistance. Nowadays, the construction industry has a great negative impact on the environment, mainly due to the generation of construction and demolition waste. One method to reduce this impact is the reuse of this waste to produce recycled aggregates for concrete. The concrete produced with recycled aggregates proves to be a less resistant material, with different characteristics from conventional concrete, largely due to the presence of mortar adhered to the recycled aggregate. The objective of this research is to evaluate the shear behavior of dry joints when produced with concrete with recycled coarse aggregates. For that 27 dry joint push-off test specimens were produced with none, one and three teeth, submitted to confining stresses of 1, 2 and 3 MPa. The concrete was produced using a substitution content of 100% of the natural coarse aggregates by recycled coarse aggregates. The results showed that the dry joints produced with concrete with recycled coarse aggregates presented similar behavior to conventional concrete with respect to cracking kinetics and post-cracking resistance, but with reduced shear strength values.

Keywords: dry joints, recycled coarse aggregate concrete, push-off.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Juntas secas de pontes segmentadas protendidas são mecanismos que permitem a ligação dos seus segmentos (aduelas) e permitem a transferência de esforços entre os mesmos.

As regiões de ligação dessas pontes assumem um papel crítico e fundamental no comportamento da estrutura, pois representam pontos de descontinuidade no projeto (TAVARES, 2000).

Nesse tipo de junta, a ligação se dá basicamente por travamento mecânico entre os segmentos, devido às saliências ao longo da altura da peça, chamadas de dentes de cisalhamento. Esses dentes são os responsáveis pela transferência de esforços entre as aduelas, e devem possuir resistência suficiente para resistir basicamente a esforços de cisalhamento (ROCHA, 2012).

A protensão nessas pontes atribui a capacidade de vencer grandes vãos e o controle de fissuração, além de servir como um mecanismo auxiliar de ligação, proporcionando um comportamento monolítico da estrutura (ROCHA, 2012).

A Figura 1 representa uma seção transversal típica de uma aduela de ponte segmentada protendida, onde podem ser observados os dentes de cisalhamento.

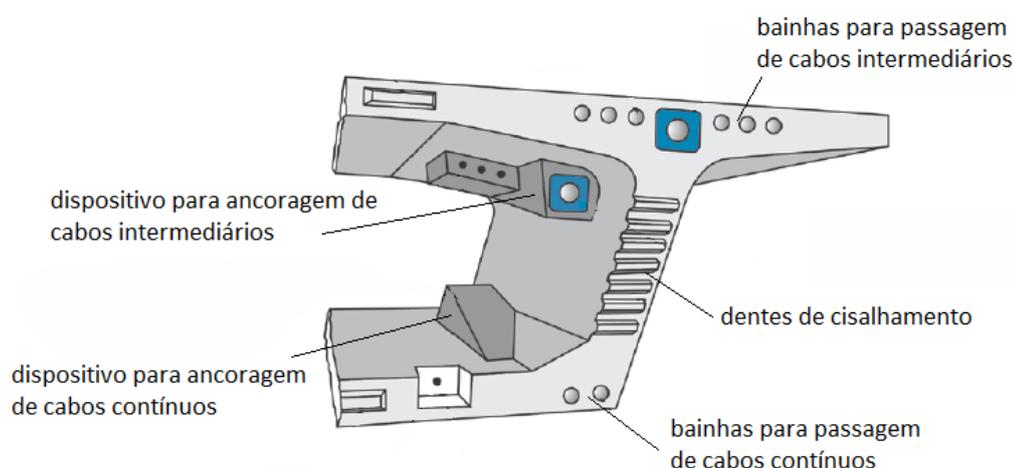


Figura 1 - Seção transversal de uma aduela protendida; Fonte: Adaptado de FHWA (2013).

Esses dentes são classificados como juntas secas pois não possuem nenhum material ligante, como uma resina por exemplo, e, portanto, a transferência de esforços se dá basicamente pelo atrito entre eles. A Figura 2 ilustra o detalhe dessas juntas.

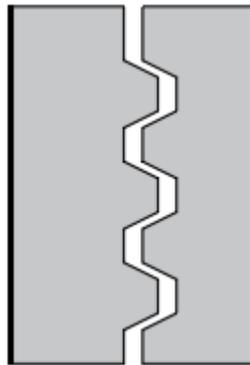


Figura 2 - Detalhe dos dentes de cisalhamento.

Nas juntas secas, a resistência total ocorre devido a combinação da resistência de duas regiões da junta: a região lisa e a região do dente. Na região lisa ocorre o contato direto entre duas interfaces de concreto, gerando atrito entre ambas. Na região do dente, a peça possui um comportamento semelhante ao de uma peça monolítica de concreto submetida à esforços de cisalhamento.

A capacidade resistente dessas juntas, portanto, está intrinsecamente relacionada com a capacidade resistente dos dentes. A protensão aplicada na ponte proporciona esforços de compressão transversais ao plano de cisalhamento dessas juntas, gerando tensões de confinamento e contribuindo para a resistência final do conjunto.

Perante os modelos existentes na literatura para explicar o comportamento mecânico do concreto ao cisalhamento, destaca-se o modelo de atrito-cisalhamento. Esse modelo prevê a formação de um plano de cisalhamento na peça, dividindo esta em duas interfaces em cisalhamento direto. Os mecanismos de transferência de tensão se dão por coesão da matriz cimentícia, fricção devido à rugosidade da interface e um papel duplo da armadura que passa pelo plano.

A previsão da resistência dessas juntas secas pode ser baseada no modelo de atrito-cisalhamento. Entende-se que a resistência da junta será uma combinação entre

o atrito gerado na parte lisa, devido o contato entre duas superfícies de concreto, com a capacidade resistente dos dentes.

Alguns fatores influenciam na resistência dessas juntas, como a magnitude da tensão de confinamento, a quantidade de dentes e as características mecânicas do concreto.

O concreto com agregados graúdos reciclados apresenta resistência inferior ao do concreto convencional devido à maior fragilidade de seus agregados. Perante os esforços de cisalhamento, os agregados que possuem resistência inferior ao da matriz cimentícia tendem a serem cortados pelas fissuras, gerando uma superfície mais lisa e com menos atrito, enquanto os que possuem resistência superior tendem a serem contornados, gerando superfícies mais rugosas (FONTEBOA *et al.*, 2010).

Isso indica que o comportamento mecânico e a resistência ao cisalhamento de juntas secas produzidas com esse tipo de concreto podem ser comprometidos e devem ser estudados, fazendo-se necessário esta pesquisa.

1.2. Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo geral desta pesquisa é investigar o comportamento mecânico ao cisalhamento de juntas secas produzidas com concreto de agregados graúdos reciclados.

1.2.2 Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste estudo foram necessários os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão do estado da arte da literatura sobre juntas secas;
- Produzir agregados graúdos reciclados e promover a caracterização destes para obtenção de suas propriedades;
- Produzir concretos com agregados graúdos reciclados para avaliação de suas propriedades mecânicas e utilizá-los na confecção dos corpos-de-prova de junta seca;

- Produzir corpos-de-prova de juntas secas com nenhum, um e três dentes com concreto de agregados graúdos reciclados para ensaios de ruptura do tipo *push-off* submetidos à tensões de confinamento de 1, 2 e 3 MPa;
- Analisar o comportamento mecânico ao cisalhamento dos corpos-de-prova de juntas secas;
- Comparar os resultados experimentais obtidos neste trabalho com os de outras pesquisas de concreto convencional;
- Avaliar a capacidade dos métodos teóricos e normativos em relação a previsão da resistência das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados.

1.3. Justificativas

Nos últimos anos, a preocupação com o meio ambiente e a escassez dos recursos naturais impulsionou as pesquisas a respeito de materiais reutilizáveis e sustentáveis. Numa escala global, a indústria da construção civil tem demonstrado um grande impacto ambiental, devido principalmente à geração de resíduos. Esses resíduos em geral, são materiais descartados como peças estruturais demolidas, cerâmicas, plásticos, armaduras, dentre outros, que, se não administrados corretamente, contaminam o meio ambiente.

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, só no Brasil em 2018 cerca de 72,7 milhões de toneladas de resíduos urbanos foram coletados, sendo que 61,25% (44,53 milhões de toneladas) foram resíduos de construção e demolição (RCD). Com o crescimento da população esses números tendem a aumentarem cada vez mais, e estima-se que no ano de 2030 o Brasil alcançará uma geração anual de 100 milhões de toneladas de resíduos urbanos.

No leque das soluções encontradas, destaca-se a reutilização desses resíduos para produção de novos concretos. O concreto produzido com agregados reciclados configura aquele confeccionado com agregados uma vez já utilizados em outros concretos, tendo como principal fonte de obtenção os resíduos de construção e demolição (RCD).

A pré-fabricação das superestruturas de pontes e viadutos confere agilidade e redução dos prazos de serviços (ROSENBLUM, 2009). O fato das peças virem prontas

para serem montadas na obra gera economia de prazo, além de um menor impacto no meio, principalmente em ambientes urbanos.

A região de ligação dessas pontes representa pontos críticos na estrutura, pois ocorrem descontinuidades, sendo assim, o comportamento mecânico da estrutura fica dependente da resistência dessas juntas. Basicamente, a capacidade resistente destas está relacionada com as propriedades mecânicas do concreto utilizado. O concreto convencional é um material já amplamente utilizado, e, a possível utilização de um novo material modificado nessas juntas necessita de estudos.

Sendo assim, o presente trabalho visa colaborar com a disseminação de informação a respeito do uso de concreto com agregados graúdos reciclados em juntas secas de pontes segmentadas protendidas. Para isso, foram confeccionadas juntas secas com concreto de agregado graúdo reciclado e submetidas a ensaios *push-off*, avaliando assim seu comportamento no tocante à resistência ao cisalhamento, utilizando a teoria do atrito-cisalhamento.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCRETO COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS

2.1.1. Definição

O concreto com agregados graúdos reciclados é definido como aquele confeccionado com o uso de agregados graúdos ou miúdos reutilizados de outros concretos, conhecidos como agregados reciclados (GONÇALVES, 2001).

O agregado que antes fora utilizado na confecção de um concreto, qualquer que seja, é separado, passa por uma etapa de adequação, para então ser utilizado novamente na confecção de outros concretos. Essa etapa de adequação é baseada em processos de beneficiamento, com a finalidade de preparar o agregado para sua reutilização.

Nos concretos de agregados reciclados, os agregados convencionais podem ser substituídos parcialmente ou totalmente pelos agregados reciclados. Esse teor de substituição determina grande parte das propriedades do concreto com agregados graúdos reciclados (BAZUCO, 1999).

A fonte de obtenção dos agregados reciclados é, em sua grande maioria, de resíduos de construção e demolição (RCD), oriundos de obras dos mais variados portes.

2.1.2. Propriedades dos agregados reciclados

O agregado reciclado apresenta elevada heterogeneidade devido à imensa variação de materiais obtidos nos resíduos de construção e demolição. Os processos de beneficiamento possibilitam retirar parte desses materiais, porém, uma parcela ainda fica aderida ao agregado reciclado.

A presença de material aderido dita as propriedades do agregado reciclado, além de ser a principal diferença entre o agregado reciclado e o agregado natural convencional.

Dentre os materiais aderidos ao agregado reciclado, o que possui maior concentração, e, portanto, o que mais contribui para as características do mesmo são

as argamassas. Devido essa argamassa aderida, o concreto produzido com agregados reciclados apresenta qualidade inferior ao concreto convencional (LI *et al.*, 2013).

As principais propriedades influenciadas pela presença de argamassa se resumem à porosidade, absorção de água, massa específica, abrasão e textura superficial dos grãos (NAOUI *et al.*, 2019).

A presença de argamassa propicia uma maior porosidade ao agregado reciclado, ocasionando uma maior absorção de água. Além disso, possuirá menor massa específica, devido ao aumento da quantidade de poros. A superfície rugosa e irregular da argamassa, propicia ainda, uma maior textura superficial para o grão de agregado, além de ser mais suscetível à abrasão.

Com relação ao mecanismo de hidratação do cimento no concreto, sabe-se que, o agregado natural quando saturado, detém uma fina película de água ao redor do mesmo. Essa película irá aumentar a relação água/cimento da matriz cimentícia em regiões próximas ao agregado, caracterizando uma zona frágil em características mecânicas, conhecida como zona de transição. A Figura 3 ilustra essa região, onde A é o agregado graúdo natural, B é a zona de transição e C é a matriz cimentícia.

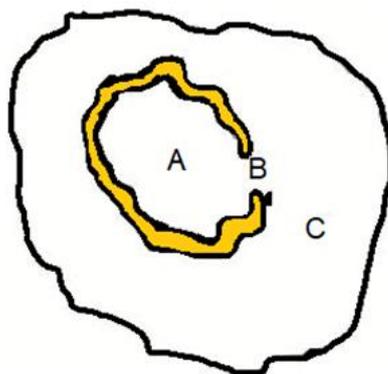


Figura 3 – Representação esquemática da zona de transição pasta-agregado no concreto; Fonte: adaptado de ARAÚJO (2015).

Em relação ao uso de agregado reciclado, ocorre a formação de uma segunda zona de transição, agora entre o agregado reciclado e a matriz cimentícia do novo concreto, como mostra a Figura 4.

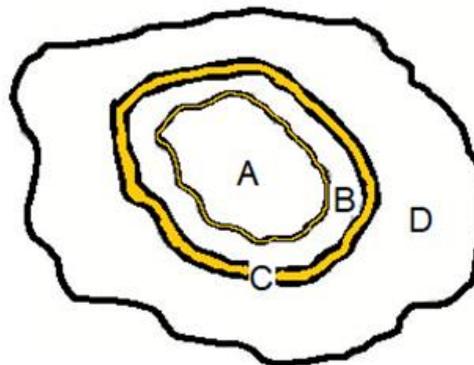


Figura 4 - Representação esquemática da zona de transição pasta-agregado reciclado no concreto; Fonte: adaptado de ARAÚJO (2015).

Na Figura 4, A é o agregado natural convencional, B é a argamassa aderida, (o agregado reciclado, portanto, é A+B), C é segunda a zona de transição e D é a matriz cimentícia.

A formação de uma nova zona de transição atribui a característica frágil ao agregado reciclado (ETXEBERRIA *et al.*, 2006 apud GRONDIN *et al.*, 2019) .

2.1.3. Propriedades do concreto devido os agregados reciclados

O agregado graúdo influencia algumas propriedades do concreto, como o módulo de elasticidade e a densidade. Estas propriedades são mais influenciadas por características físicas do que químicas, como volume, forma, granulometria e distribuição de poros (GONÇALVES, 2001).

Quando analisa-se a resistência, a influência dos agregado para concretos de baixa e média resistência é menor que das outras duas fases, exceto para agregados altamente porosos e fracos (GONÇALVES, 2001).

Dentre as propriedades mais importantes a serem estudadas nos concretos de agregados reciclados para a utilização estrutural estão o módulo de elasticidade, a resistência à compressão, a resistência à tração, a resistência ao cisalhamento e a absorção de água.

O módulo de elasticidade do concreto está relacionado ao tipo e quantidade de agregado que ele possui (NEVILE, 2011). Segundo Faleschini *et al.* (2016), o módulo de elasticidade do concreto pode diminuir cerca de 45% em teores de substituição de 100% dos agregados naturais por agregados reciclados.

A resistência à compressão dos concretos é diretamente influenciada pela permeabilidade e porosidade da pasta de cimento, dos agregados e da zona de transição. Em se tratando dos agregados reciclados, sabe-se que estes possuem elevada porosidade, conseqüentemente elevada permeabilidade, isso se dá devido à presença de argamassa aderida ao agregado natural. Essa porosidade afeta negativamente a resistência à compressão do concreto, pois, quanto maior o volume de poros, menor o nível de tensão que o concreto pode suportar. Khatab *et al.* (2019) mostraram que para um teor de substituição de 50% de agregados naturais por reciclados houve uma diminuição de 12% da resistência à compressão do concreto. Esse valor alcançou 23% de diminuição quando o teor de substituição foi de 100%.

Para a utilização estrutural, desconsidera-se geralmente a resistência à tração do concreto. Porém, quando é feito um estudo criterioso das propriedades do concreto, principalmente quando são utilizados novos materiais, essa propriedade mecânica não pode ser desprezada (LEITE, 2001). Gonçalves (2011) afirma que para a resistência à tração, a substituição dos agregados naturais pelos reciclados provoca uma redução na mesma.

A resistência ao cisalhamento dos concretos está diretamente ligada com a resistência dos agregados graúdos, uma vez que, as fissuras quando se propagam na matriz cimentícia, tendem a contorná-los. Se os agregados apresentam baixa resistência, as fissuras tendem a cortá-los, observando diminuição da capacidade cisalhante do concreto. Rahal (2017) mostrou que para um teor de substituição de 20% e 50% de agregados naturais por agregados reciclados apresentou uma diminuição da resistência ao cisalhamento de 7%. Quando o teor de substituição aumentou para 100% a resistência ao cisalhamento diminuiu 28%.

A análise da absorção de água em agregados reciclados é de extrema importância, pois sendo um material mais poroso que o agregado convencional, ele pode interferir no comportamento do concreto, podendo prejudicar a durabilidade e a resistência do novo material (TROIAN, 2010). A maior absorção de água dos agregados reciclados contribui negativamente para a trabalhabilidade do concreto com agregados graúdos reciclados no estado fresco, pois retira água da mistura, sendo necessário o aumento da relação a/c, comprometendo assim propriedades no estado endurecido (TABSH; ABDELFAH, 2009). Naouaoui *et al.* (2019) cita que os agregados reciclados podem aumentar a absorção de água do concreto em até 50%.

2.2. TEORIA DO ATRITO-CISALHAMENTO

2.2.1. Definição

A teoria do atrito-cisalhamento foi estabelecida em 1966 com o trabalho de Philip W. Birkeland e Halvard W. Birkeland intitulado “*Connections in Precast Concrete Constructions*”, onde os autores avaliaram diversos tipos de conexões de elementos pré-fabricados e formularam uma hipótese que explicava o mecanismo de transferência de forças entre uma interface de concreto e outra, sendo a partir de então, utilizada pela grande maioria das normas de dimensionamento de estruturas de concreto.

Esta teoria permite estimar a resistência ao cisalhamento de diferentes tipos de interface concreto-concreto, como por exemplo:

- a) a interface de um concreto pré-moldado e um moldado no local;
- b) a interface de dois elementos moldados em diferentes idades;
- c) a interface entre duas partes de uma junta;
- d) a interface de um elemento já existente e de um elemento de reforço;
- e) a interface de dois elementos gerados por uma fissura.

Segundo Santos e Júlio (2012), duas situações podem ser consideradas: a primeira é em relação à resistência ao cisalhamento de uma interface sem perda de coesão. A segunda diz respeito à uma interface com perda de adesão e, conseqüentemente, um deslizamento entre ambas. A teoria do atrito-cisalhamento se aplica à segunda situação, onde o comportamento da interface passa a ser controlado por fricção e dupla-ação da armadura.

A fricção, denominada também como atrito, surge quando a coesão é rompida. Ela ocorre quando as interfaces de concreto deslizam uma em relação à outra, e está relacionada com a rugosidade das interfaces. Ocorre nessa etapa intertravamento mecânico devido ao engrenamento dos agregados na superfície rugosa. Na peça, quando submetida a um carregamento externo, surgem tensões confinantes na interface. Devido à rugosidade das superfícies, os agregados podem ser compreendidos como “dentes de cisalhamento”, sendo assim, quando as interfaces deslizam uma em relação à outra, promovem um intertravamento mecânico entre eles. A rugosidade, portanto, é de grande importância para essa parcela de resistência.

A dupla-ação da armadura é um mecanismo que ativa duas parcelas de resistência oriundas da armadura. A primeira diz respeito às tensões de compressão entre duas interfaces de concreto quando a armadura é tracionada, aplicando um efeito confinante ou restrição da separação entre as interfaces. A segunda está relacionada com um efeito pino que a armadura promove devido ao seu posicionamento transversal às interfaces e perpendicular à força cisalhante.

Essas três parcelas de resistência relacionadas entre si são a base da teoria do atrito-cisalhamento, e o mecanismo de transferência de tensões entre duas interfaces de concreto está relacionado com a ocorrência e intensidade de cada uma das parcelas.

A Figura 5 ilustra o modelo conhecido como serra-de-dentes ou dentes de cisalhamento, usado para demonstrar a ocorrência das três parcelas de resistência, segundo a teoria do atrito-cisalhamento.

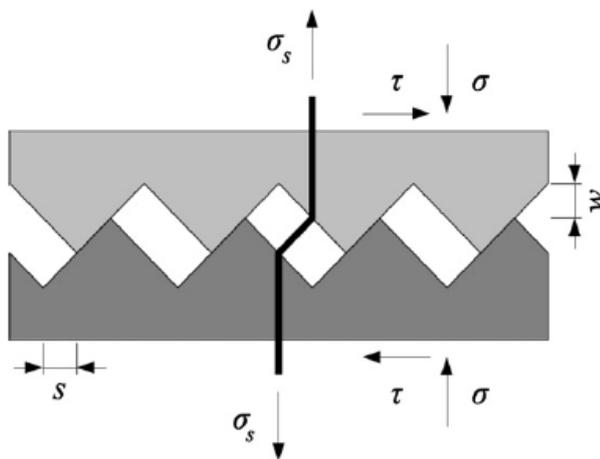


Figura 5 - Modelo serra-de-dentes; Fonte SANTOS e JÚLIO (2012).

O modelo ilustrado na Figura 5 pode ser usado para compreender o efeito de fricção devido ao engrenamento dos agregados provocado por uma força confinante externa. Os agregados são os dentes ou serras e a força confinante externa é simulada pela reação de compressão σ provocada pela tensão de tração σ_s que a armadura sofre quando ocorre uma deformação vertical w devido a um deslizamento s , originado por uma tensão de cisalhamento τ .

A Figura 6 ilustra a intensidade das parcelas de resistência segundo a teoria do atrito-cisalhamento.

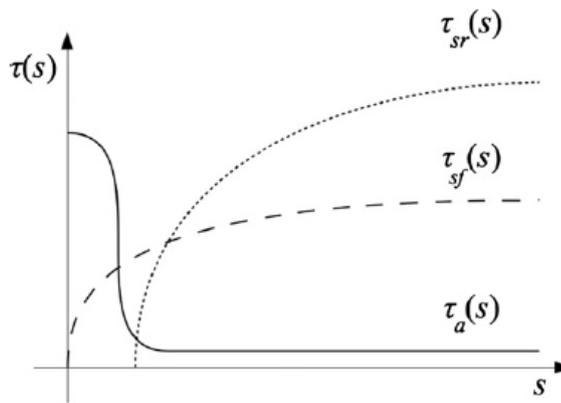


Figura 6 - Mecanismo de transferência de carga; Fonte: (ZILCH; REINECKE, 2000).

A tensão de cisalhamento em uma interface concreto-concreto, $\tau(s)$, devido uma fissura com um deslocamento longitudinal entre as duas partes de concreto iguais a s , correspondente a uma dilatação w , é dado de acordo com a Equação 1.

$$\tau(s) = \tau_a(s) + \tau_{sf}(s) + \tau_{sr}(s) \quad (1)$$

onde:

$\tau_a(s)$ é a parcela de resistência devido à coesão;

$\tau_{sf}(s)$ é a parcela de resistência devido à fricção;

$\tau_{sr}(s)$ é a parcela de resistência devido ao reforço (armadura).

2.2.2. A teoria inicial do atrito-cisalhamento proposta por Birkeland P. e Birkeland H.

A teoria inicial do atrito-cisalhamento proposta por Birkeland P. e Birkeland H. (1996) estabelece que o mecanismo de transferência de tensões cisalhantes em uma interface de concreto-concreto submetida simultaneamente à cisalhamento e compressão, são resistidas somente por atrito.

Para entender melhor o mecanismo considere a Figura 7 a seguir, na qual ilustra uma peça de concreto submetida à uma força cisalhante V e uma força de compressão P .

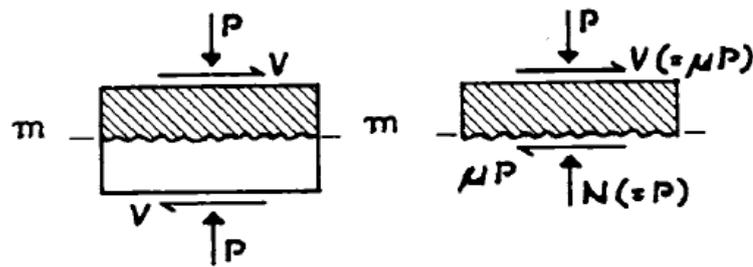


Figura 7 - Peça de concreto submetida à tensões cisalhantes e tensões de compressão; Fonte: BIRKELAND; BIRKELAND (1966).

No plano $m - m$ encontra-se uma fissura surgindo uma interface concreto-concreto. A força de cisalhamento V tende a produzir um deslizamento ao longo desse plano. O deslizamento é resistido por uma força de fricção μP provocada pela força de confinamento externa P .

Sendo a superfície da fissura $m - m$ rugosa, a força de cisalhamento V tende a provocar uma separação vertical das interfaces representada pelo deslocamento δ na Figura 8.

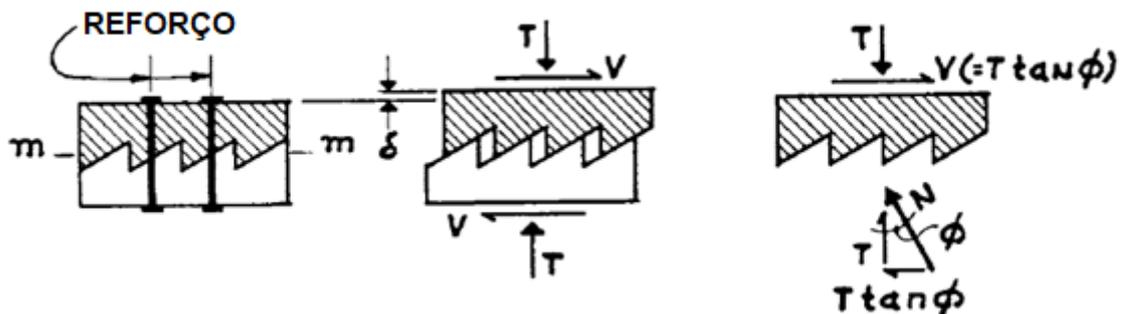


Figura 8 - Hipótese da teoria atrito-cisalhamento; Fonte: Adaptado de BIRKELAND; BIRKELAND (1966).

Segundo Birkeland P. e Birkeland H. (1996), se uma armadura de reforço for posicionada transversalmente às interfaces, o deslocamento δ tenderá a produzir uma força de tração T na armadura. Se a armadura estiver devidamente ancorada em ambas as superfícies, a força T provocará uma força confinante de igual magnitude, surgindo uma tensão de compressão na interface concreto-concreto.

A rugosidade pode ser vista como uma série de dentes inclinados a um ângulo ϕ . Comparando a Figura 7 com a Figura 8, a força de compressão P é equivalente à força T , portanto a força de fricção μP é equivalente a $T \tan \phi$.

A capacidade última de cisalhamento V_u é, portanto, dada pelas Equações 2 e 3.

$$V_u = T_u \cdot \tan\varphi = A_s \cdot f_y \cdot \tan\varphi \quad (2)$$

$$\tau_u = V_u/A_g = p \cdot f_y \cdot \tan\varphi \quad (3)$$

onde:

V_u é a força de cisalhamento última;

A_s é a área de aço total atravessando a interface;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

$\tan\varphi$ é o coeficiente de atrito;

A_g é a área bruta da seção transversal da peça;

τ_u é a tensão de cisalhamento última;

p é a taxa de armadura, dada por A_s/A_g .

Os autores atribuíram os seguintes valores para $\tan\varphi$:

- 1,7 para concreto monolítico;
- 1,4 para juntas artificialmente rugosas;
- 0,8 para juntas de concreto convencional;
- 1,0 para interfaces de concreto e aço.

Birkeland P. e Birkeland H. (1966) consideraram a armadura de reforço submetida apenas à forças de tração, portanto, a dupla-ação da armadura não foi considerada. A parcela de coesão também não foi considerada, já que a peça de concreto já se apresentou rompida, representada pela fissura. O mecanismo de resistência, portanto, foi estabelecido apenas pela força de fricção originada pela rugosidade da interface submetida a forças de confinamento.

Com o passar dos anos e avanços no estudo da teoria do atrito-cisalhamento inúmeros autores introduziram outras parcelas na equação base da teoria, (representada pela Equação 1), como a parcela de coesão, dupla-ação da armadura, resistência do concreto, taxa de confinamento, dentre outras (MATTOCK; HAWKINS, 1972, MATTOCK *et al.*, 1976, LOOV, 1978, WALRAVEN *et al.*, 1987, MATTOCK, 1988, RANDL, 1997, ALI; WHITE, 1999, MATTOCK, 2001).

2.2.3. Cisalhamento em concretos com agregados reciclados

O concreto com agregado reciclado apresenta propriedades diferentes do concreto convencional em termos de resistência. Isso se dá, principalmente, pela presença de argamassa aderida aos agregados reciclados que não são de fácil remoção nos processos de beneficiamento, sendo o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados o principal parâmetro que influencia nessa diferença.

Em concretos convencionais, as fissuras percorrem a matriz cimentícia e se propagam ao redor dos grãos de agregados, pois estes, apresentam resistências maiores do que a própria matriz. Um comportamento diferente ocorre em concretos onde a matriz cimentícia é mais resistente do que o agregado, caso dos concretos de alta resistência e concretos leves. Nesses concretos, as fissuras atravessam os agregados, como mostra a Figura 9.

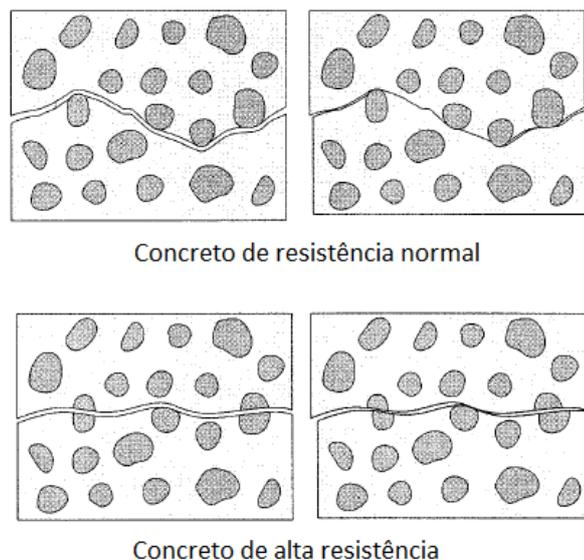


Figura 9 - Esquema de fissuração de concretos com resistência normal e de alta resistência; Fonte: Adaptado de ALI; WHITE (1999).

Um comportamento semelhante ao desses concretos ocorre em concretos com agregados reciclados. Nesses concretos, a argamassa aderida aos grãos geralmente possui resistência inferior à matriz cimentícia do concreto, sendo, portanto, um elo de menor rigidez, com tendência à ruptura e propagação de fissuras. Com isso, o concreto com agregados reciclados apresenta menor resistência ao cisalhamento comparado com o concreto convencional.

Essa característica é mais acentuada quando são utilizadas armaduras atravessando o plano de cisalhamento, pois, como a teoria do atrito-cisalhamento explica, a armadura irá gerar tensões confinantes na interface, aumentando o engrenamento dos agregados. Entretanto, uma maior taxa de armadura favorece a resistência e proporciona a esses concretos maiores capacidades resistentes.

O teor de substituição dos agregados convencionais pelos reciclados é outro fator que impacta na resistência ao cisalhamento desses concretos, sendo a redução da capacidade resistente proporcional ao aumento do teor de substituição. Xiao *et al.* (2012) verificaram que um teor limite de 30% de substituição não impacta na resistência ao cisalhamento.

O mesmo comportamento ocorreu em Trindade (2017) para concretos reciclados onde a matriz cimentícia possuía resistência inferior ao do agregado. A autora pôde concluir que para concretos confeccionados com agregados reciclados com resistência inferior ao da matriz cimentícia o teor de substituição dos agregados naturais pelos mesmos interfere na resistência ao cisalhamento, enquanto que para concretos com agregados reciclados com resistência superior ao da matriz cimentícia esse fenômeno não ocorre.

2.3. JUNTAS SECAS DE CONCRETO

2.3.1. Introdução

A indústria da construção de obras de arte ao longo dos anos sofreu diversas alterações com a finalidade de melhorar as técnicas de construção e atender as requisições do mercado. A procura pela redução dos custos e tempo de construção, junto com a necessidade de aumento da qualidade, motivou o desenvolvimento de várias técnicas para o emprego de estruturas de pontes segmentadas de concreto pré-moldadas e pré-fabricadas (ROCHA, 2012).

A tecnologia de construção de pontes com aduelas pré-fabricadas teve seu surgimento na França, em meados dos anos sessenta, devido à urgência de se empregar métodos construtivos de alto rendimento, mecanização e menor quantidade de mão-de-obra especializada, além da necessidade de construir em ambientes densamente urbanizados. Assim, tornando-se possível a execução de superestruturas em menores períodos de tempo e com menores custos (TARRATACA, 2009).

As construções em vigas pré-moldadas constituem uma das soluções mais práticas e econômicas. Nas superestruturas de pontes, a pré-fabricação pode ser feita dividindo-se a estrutura em segmentos, chamados de aduelas pré-moldadas, com a largura de todo ou quase todo o tabuleiro, e com comprimentos da ordem de 3 a 7 metros, com pesos entre 500 e 3000 kN (PFIEL, 1984).

As inúmeras vantagens desse tipo de estrutura, como construção rápida e versátil, sem interrupções no nível do solo, alto controle de qualidade e economia de custos as tornaram a solução preferida para muitas estradas e pontes (ROMBACH; SPECKER, 2002).

Na região de ligação das aduelas encontram-se as juntas, que podem ser classificadas como secas, quando não possuem nenhum material ligante e a transferência de esforços se dá por contato direto, ou podem possuir algum material como resina epóxi, que lubrifica, facilita o encaixe e melhora o acoplamento das partes. A junta com epóxi proporciona um comportamento monolítico dos segmentos, simulando uma viga contínua porém com suas armaduras interrompidas (LI *et al.*, 2013).

Segundo Liu *et al.* (2019) as juntas que conectam os segmentos devem ser capazes de transferir esforço cisalhante, sendo a resistência ao cisalhamento das juntas um critério de extrema importância. A região das juntas representa um ponto de descontinuidade na estrutura e merecem total atenção. O comportamento da estrutura como um todo possui ligação direta com o das juntas, por isso, é imprescindível analisar seu comportamento na fase de projeto.

Tavares (2000) afirma que a previsão do comportamento das juntas é importante, pois representam descontinuidades na viga. A abertura das juntas é influenciada pela existência ou não de armadura ordinária passante, pelo tipo de aderência, pelo material ligante entre as aduelas, pela geometria da aduela, entre outros fatores, que interferem no comportamento global da viga.

O uso de protensão com o propósito de unir as peças segmentadas, objetivando o monolitismo da estrutura, introduz tensões de compressão transversais à superfície na região das juntas. Essas tensões confinam a interface cisalhante, submetendo a mesma tanto às tensões de cisalhamento quanto às tensões de

compressão. Essas tensões confinantes aumentam a capacidade resistente ao cisalhamento da junta.

As formas iniciais dessas pontes normalmente usavam dentes de cisalhamento únicos na seção da alma, que podiam ser armados. A prática atual, no entanto, é usar vários dentes que geralmente não são armados no plano de cisalhamento, distribuídos ao longo da altura da alma e nas mesas, providenciando um melhor intertravamento (ZHOU *et al.*, 2005).

A Figura 10 ilustra a seção transversal de uma aduela com ênfase na região da junta seca com detalhe para os dentes de cisalhamento.

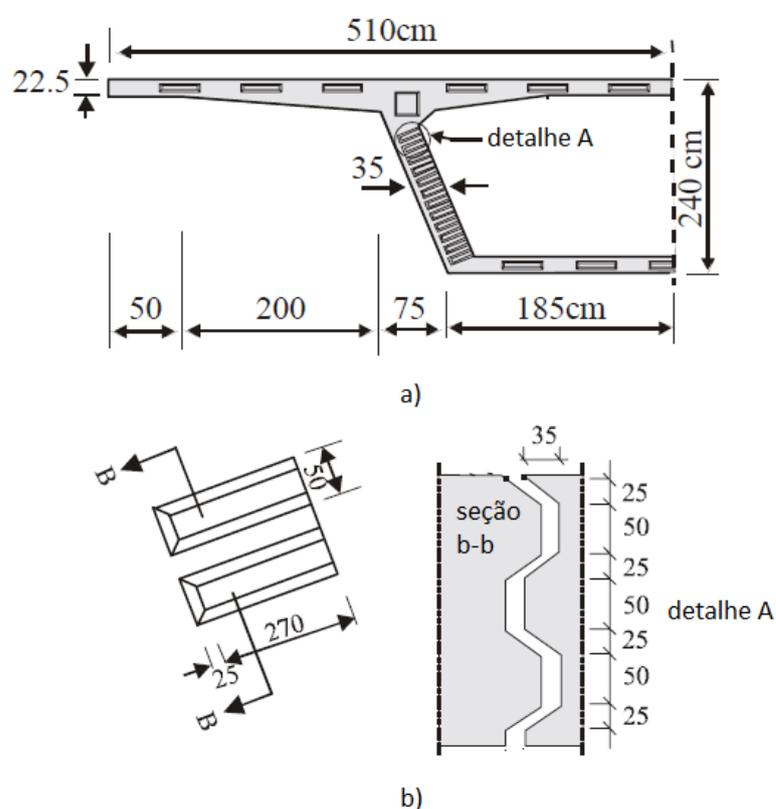


Figura 10 – Aduela pré-moldada: a) seção transversal da aduela, b) detalhe de um dente de cisalhamento; Fonte: adaptado de ROMBACH; SPECKER (2002).

2.3.2. Mecanismo de resistência das juntas secas

Como visto anteriormente, o modelo atrito-cisalhamento é efetivo para prever o comportamento entre duas interfaces de concreto submetidas à esforços cisalhantes. No caso das juntas secas, esse modelo permite avaliar a resistência ao cisalhamento das mesmas.

Entende-se que a capacidade cisalhante da junta se dá por uma combinação da resistência da parte lisa da junta com a capacidade resistente do dente de cisalhamento.

A parte lisa da junta compreende a região de contato direto entre as duas peças que compõem a junta seca, enquanto que a região do dente está relacionada com a base do dente de cisalhamento. A Figura 11 a) ilustra toda a junta, a b) a região lisa e c) a região dos dentes de cisalhamento de uma junta seca.

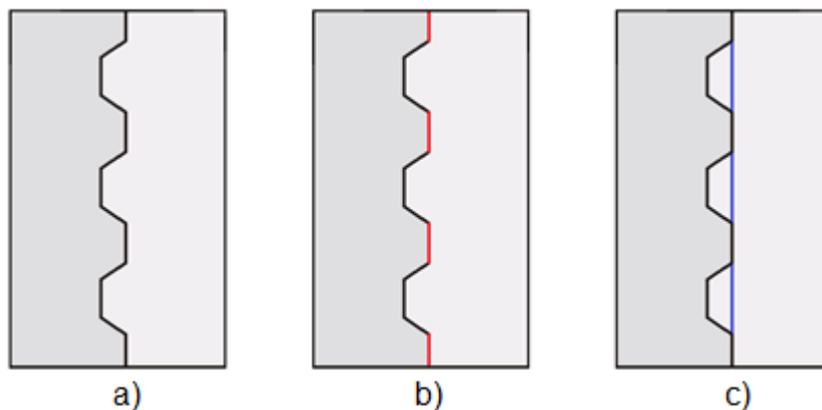


Figura 11 – Esquema de junta seca: a) toda a junta, b) parte lisa e c) região dos dentes de cisalhamento; Adaptado de ROMBACH; SPECKER (2002).

Na região lisa da junta, a resistência se dá pela restrição ao deslocamento entre as duas interfaces de concreto. Como prevê a teoria do atrito-cisalhamento, quando duas interfaces de concreto são submetidas a tensões cisalhantes, a resistência ao deslocamento será governada pelo o atrito entre ambas.

Considere a junta seca lisa submetida a um ensaio *push-off* na Figura 12.

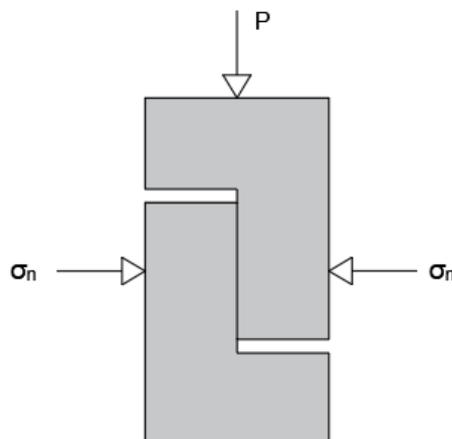


Figura 12 – Corpo-de-prova de junta seca lisa submetido a um ensaio *push-off*.

A força P está situada diretamente no plano de cisalhamento da junta. Não ocorrem, portanto, esforços devido a momentos. Uma tensão confinante σ_n é aplicada na lateral do corpo-de-prova.

Com o aumento da força P , o corpo-de-prova superior tende a deslizar verticalmente para baixo. Devido à rugosidade da superfície do corpo-de-prova de concreto, uma tensão de atrito V surgirá se opondo à força P . Essa rugosidade pode ser demonstrada como uma série de dentes inclinados a um ângulo ϕ por meio da Figura 13.

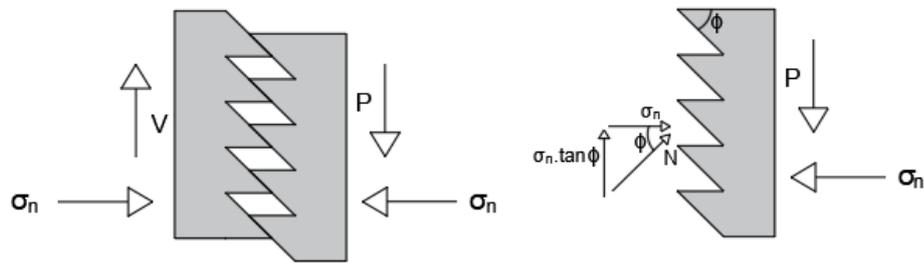


Figura 13 - Modelo serra de dente para ilustrar a rugosidade de superfícies.

A rugosidade de uma superfície se dá pelas irregularidades e protuberâncias que ocorrem de forma natural nas peças de concreto, parte devido às fôrmas utilizadas na confecção da peça, parte devido aos agregados expostos na superfície da matriz cimentícia. O atrito gerado, se dá, portanto, devido ao intertravamento mecânico dessas protuberâncias.

Em sua teoria do atrito-cisalhamento, Birkeland P. e Birkeland H. (1966) propõem que essa tensão de atrito seja calculada por $\sigma_n \cdot \tan\phi$. O termo $\tan\phi$ é denominado coeficiente de fricção μ .

Portanto, a força cisalhante numa interface lisa de uma junta seca é calculada pela Equação 4 a seguir.

$$V_u = \mu \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n \quad (4)$$

Onde μ é o coeficiente de fricção, A_{sm} é a área lisa da junta e σ_n é a tensão confinante.

O coeficiente de fricção μ depende do material, da rugosidade da superfície e da tensão de confinamento aplicada. No geral, estudos mostram que para o concreto convencional de resistência à compressão moderada esse valor é cerca de 0,6.

Já nas juntas com dente de cisalhamento um estado biaxial de tensão predomina. Para ilustrar esse comportamento considere a junta seca com um dente de cisalhamento submetida a um ensaio *push-off* na Figura 14.

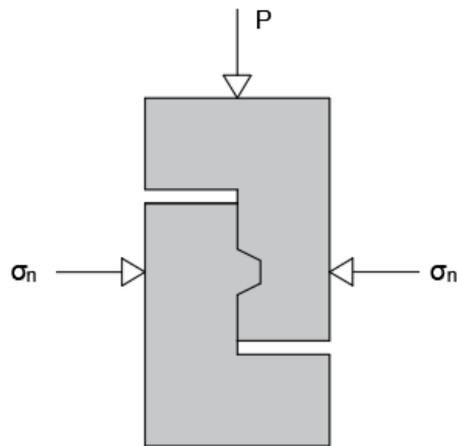


Figura 14 – Corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento submetido a um ensaio *push-off*.

Assim como no exemplo anterior, uma força P é aplicada no topo do corpo-de-prova e uma tensão confinante σ_n na lateral. Um elemento infinitesimal situado no plano de cisalhamento da junta está submetido a um estado biaxial de tensões, como pode ser visto na Figura 15.

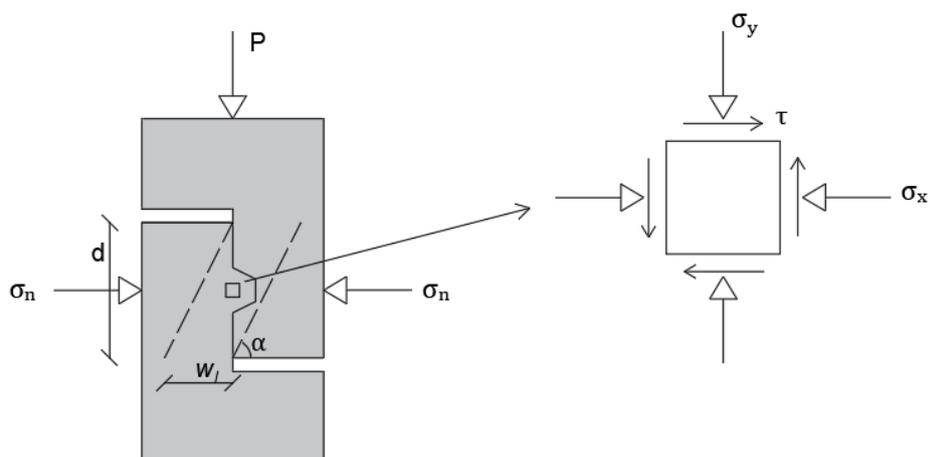


Figura 15 - Elemento infinitesimal localizado próximo ao plano de cisalhamento do dente.

Onde σ_y é a tensão de compressão vertical, τ é a tensão cisalhante e σ_x é a tensão confinante. As tensões σ_y e τ podem ser calculadas pelas Equações 5 e 6 a seguir.

$$\sigma_y = \frac{P}{b \cdot w_l} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{P}{b \cdot d} \quad (6)$$

Onde b é a espessura do corpo-de-prova, d a altura do plano de cisalhamento da junta e w_l é a largura da base.

Roberts *et al.* (1993) afirma que o dente irá romper quando a tensão máxima de tração atingir a resistência à tração do concreto f_t . Portanto, a ruptura da junta será em função da capacidade resistente do concreto e da envoltória de tensões que predomina no elemento infinitesimal, como ilustra a Figura 16.

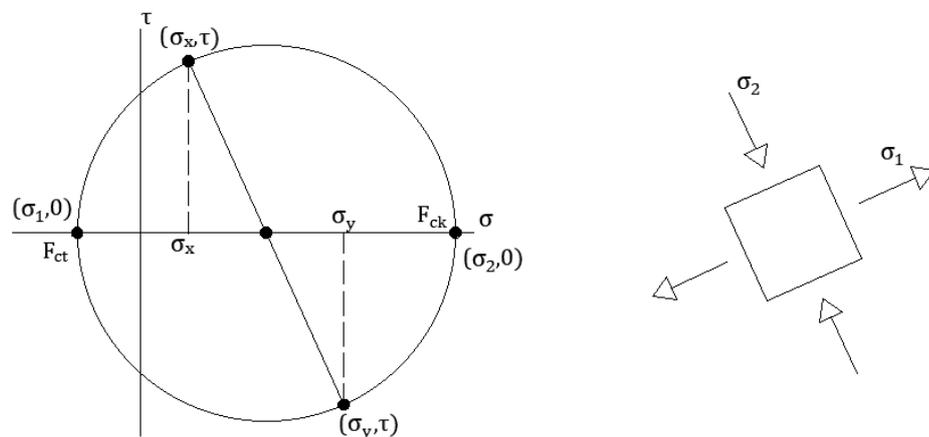


Figura 16 - Círculo de Mohr descrevendo o comportamento de um elemento infinitesimal próximo ao plano de ruptura do dente; Fonte: Adaptado de LIU *et al.* (2019).

Onde as tensões σ_1 e σ_2 são as tensões principais.

No geral, considera-se a resistência à tração do concreto em função da resistência à compressão f_c , logo, a equação da capacidade cisalhante do dente de cisalhamento toma a forma da Equação 7.

$$V_u = (C1 + C2\sigma_n)A_k\sqrt{f_c} \quad (7)$$

Onde $C1$ e $C2$ são constantes, σ_n é a tensão de confinamento, A_k é a área de cisalhamento do dente e f_c a resistência à compressão do concreto.

Percebe-se na equação acima que a tensão confinante desempenha um papel importante na resistência. De fato, o aumento de seu valor acarreta em um ganho de resistência ao cisalhamento da junta. Isso se explica pelo deslocamento do círculo de Mohr para a direita, como pode ser visto na Figura 17, aumentando assim, a carga que causará a máxima tensão de tração no concreto (ROBERTS *et al.*,1993).

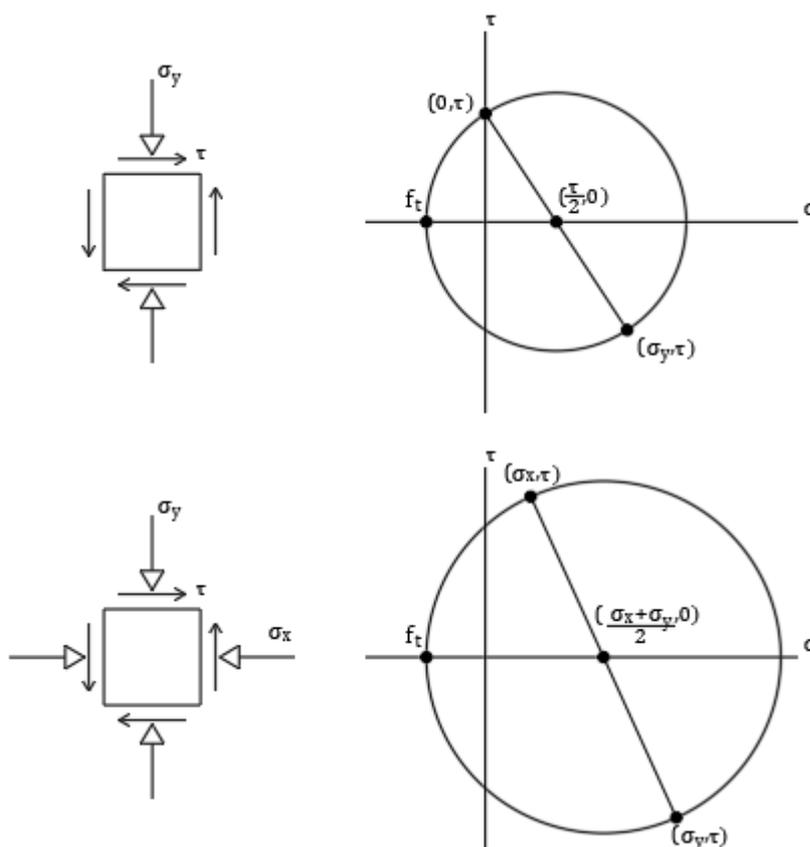


Figura 17 - Comparação entre os círculos de Mohr de elementos infinitesimais com e sem a presença de tensão confinante; Fonte: Adaptado de ROBERTS *et al.* (1993).

Além dos aspectos citados anteriormente, a tensão confinante é responsável também por providenciar uma maior fricção entre as interfaces.

Além da tensão confinante, o formato dos dentes, a quantidade de dentes e a resistência à compressão do concreto são considerados parâmetros de resistência das juntas secas.

A geometria dos dentes geralmente remete ao formato trapezoidal, pois providencia facilidade de moldagem e um bom travamento entre as peças. Yang *et al.*

(2013) avaliaram o ângulo de inclinação dos dentes, ilustrado na Figura 18, e perceberam que quanto maior for o ângulo, maior será a capacidade resistente da junta.

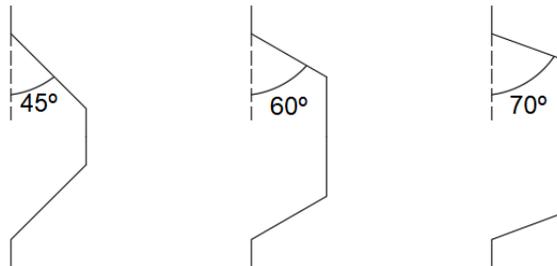


Figura 18 - Dentes de cisalhamento com diferentes inclinações.

A quantidade de dentes é um parâmetro crucial de análise, pois, o comportamento da junta seca de um dente difere da junta seca de múltiplos dentes. Além disso, observa-se que não existe uma tendência de proporcionalidade entre a resistência dos dentes.

Por exemplo, uma junta seca de três dentes não apresenta o triplo da resistência de uma junta seca de um dente. Sendo a resistência da junta de três dentes inferior.

Outra observação é que a capacidade média resistente de cada dente numa junta de múltiplos dentes tende a ser inferior daquela de um dente. Isso ocorre principalmente devido às imperfeições de montagem que existem em juntas com vários dentes.

A generalização da resistência de juntas secas de um dente para juntas secas de múltiplos dentes acarretam valores superiores à realidade. Buyukozturk *et al.* (1990) comentam que esse efeito é devido a três fatores:

- a) não se leva em consideração a concentração de tensões nas extremidades das juntas;
- b) desconsidera-se o fato de que em juntas lisas a carga última pode ser atingida em valores de deslocamentos elevados que não são possíveis de serem atingidos em juntas com múltiplos dentes;

- c) atribui um esforço cisalhante uniforme distribuído em cada dente na junta, e assumem que o colapso ocorre em todas ao mesmo tempo, desconsiderando a falha progressiva dos dentes.

Liu *et al.* (2019) compararam a resistência de juntas secas possuindo um dente e três dentes utilizando concreto de ultra alta resistência. Eles perceberam que a resistência da junta de três dentes é cerca de 30% inferior de uma analogia de três vezes a resistência da junta de um dente.

Quando analisada a tensão de cisalhamento média na junta, observou-se que nas de múltiplos dentes não ocorrem valores de tensões iguais para cada dente. Isso acarreta numa falha em sequência quando atingidas as cargas de ruptura. Alcade *et al.* (2013) comentam que para altas tensões confinantes, um comportamento mais plástico ocorre nas juntas, permitindo que todos os dentes possam desenvolver sua total capacidade resistente.

A ruptura da junta se dá por fissuração no plano de cisalhamento e sua consequente redução progressiva de resistência. Assim como na teoria do atrito-cisalhamento, a resistência do concreto, portanto, desempenha um papel primordial nesse quesito. Pois, quanto maior a resistência à tração, maiores cargas o concreto irá resistir antes da fissuração.

2.3.3. Mecanismo de falha das juntas

Segundo Rocha (2012), quando a viga segmentada está submetida à uma força de compressão que mantém a seção da junta totalmente comprimida, o seu comportamento é semelhante ao de uma viga monolítica. Quando isto não ocorre, o carregamento atuante provoca a abertura das juntas e a viga se comporta como uma estrutura fissurada em locais determinados, ou seja, as aduelas funcionam como blocos de concreto. Ocorrendo a abertura das juntas, o comportamento da estrutura passa a depender muito do tipo de junta e da dimensão da abertura dessas juntas.

Segundo Rombach e Specker (2002), no início do carregamento, toda a estrutura se comporta de forma monolítica e a deflexão aumenta linearmente com o incremento da carga. Para um determinado momento no meio do vão, a primeira junta perto do meio do vão começa a abrir rapidamente resultando em uma elevada perda de rigidez. O braço de alavanca das forças internas mantém-se quase constante,

portanto, a curva de momento-deflexão tem comportamento próxima ao linear. A estrutura vem ao colapso devido ao esmagamento do concreto na parte superior da aduela.

Na Figura 19 mostra-se um esquema de abertura das juntas devido a: a) momentos positivos e b) momentos negativos.

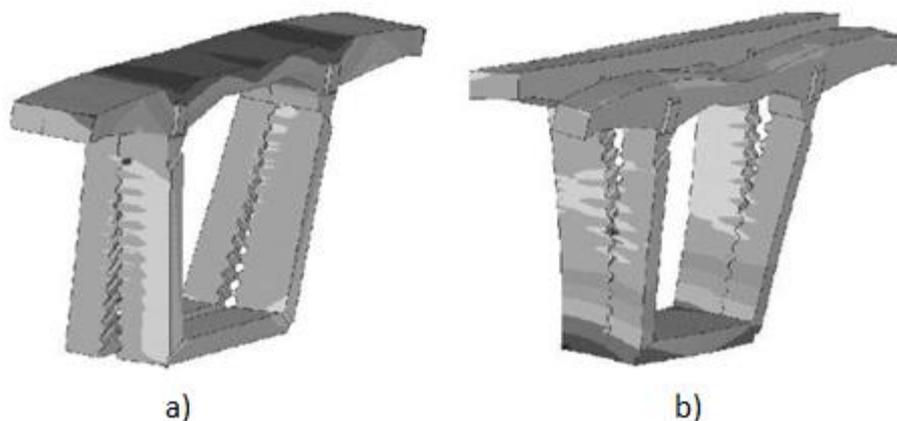


Figura 19 - Abertura de juntas entre aduelas: a) devido momentos positivos e b) momentos negativos; Fonte: adaptado de ROMBACH; SPECKER (2002).

LI *et al.* (2013) relatam que existem três principais tipos de falhas nas juntas: a primeira é relacionada com a ruptura por cisalhamento dos dentes devido às forças cisalhantes. A segunda é em relação à falha provocada por compressão e cisalhamento quando a junta está submetida a esforços conjuntos de cisalhamento e flexão. A terceira é a falha ao longo da junta, devido abertura da mesma antes que a ruptura ocorra, provocada quando carregamentos estão situados próximos à junta.

A propagação das fissuras varia conforme o tipo de ruptura. Quando estas estão relacionadas com a ruptura dos dentes de cisalhamento, as fissuras tendem a serem inclinadas. Um comportamento similar ocorre em rupturas relacionadas à ação conjunta de cisalhamento e flexão, onde as fissuras se desenvolvem em direção ao ponto de carregamento. Em situações onde a aplicação de carga se dá próxima a região das juntas, a propagação das fissuras pode se dar de maneira vertical, seguindo o plano de cisalhamento (LI *et al.*, 2013).

Zhou *et al.* (2005) explicam detalhadamente a ruptura por cisalhamento dos dentes. Quando a tensão máxima é atingida, uma fissura se forma na parte inferior do dente da parte macho da junta, propagando-se para longe do plano de cisalhamento aproximadamente a 45 graus em relação à horizontal. Depois que essa fissura se

forma, a maior parte da carga é transferida ao longo da superfície inferior do dente. Pequenas fissuras também se formam no canto superior do dente. Com o incremento da carga essas pequenas fissuras diagonais começam a aparecer, algumas delas estendendo à face de baixo do dente, indicando a formação de um apoio de compressão. Na carga máxima, as fissuras do topo se juntam e separam o dente da parte macho do corpo-de-prova. Isto é acompanhado por um deslizamento das duas partes da junta.

A Figura 20 apresentada por Alcade *et al.* (2013) ilustra a fissuração de um corpo-de-prova rompido por ensaio *push-off* simulado computacionalmente, sendo, portanto, a falha dada por ruptura dos dentes de cisalhamento.

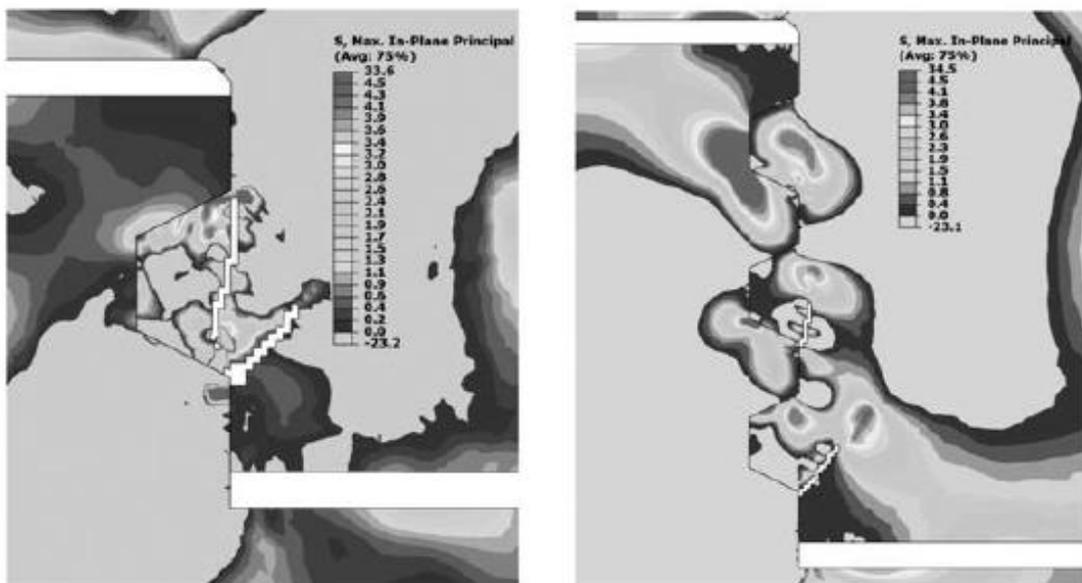


Figura 20 - Padrões de fissuras obtidos a partir da análise numérica de juntas com 1 e 3 dentes; Fonte: ALCALDE *et al.* (2013).

A Figura 21 mostra o comportamento encontrado por Zhou *et al.* (2005) relativo à ruptura das juntas de um dente e de três dentes.

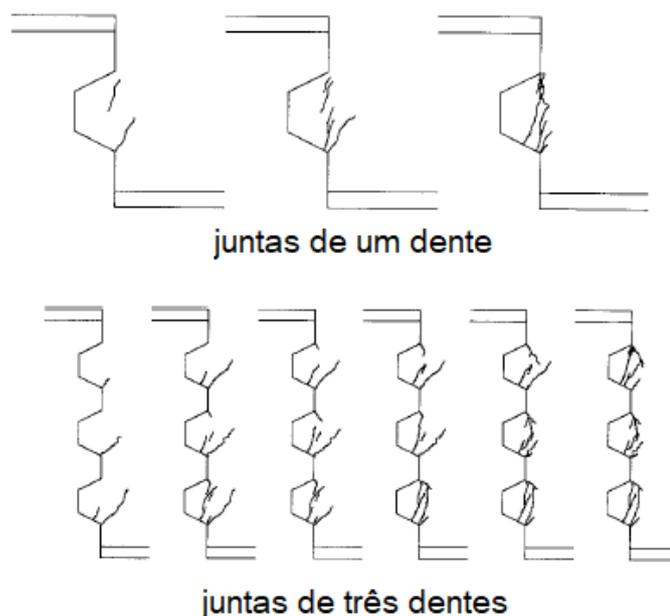


Figura 21 - Ruptura das juntas de um e de três dentes; Fonte: adaptado de ZHOU *et al.* (2005).

2.3.4. Recomendações normativas

Dentre as diretrizes normativas para o cálculo de juntas secas de pontes segmentadas protendidas encontram-se em destaque as da *American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO* (1999) e da *Asociación Técnica Española de Pretensado - ATEP* (1996). Percebe-se que a Equação (8) utilizada pela AASHTO (1999) leva em consideração tanto a área de contato nas juntas quanto a área de cisalhamento no dente, sendo, portanto, a resistência total da junta uma soma entre ambas. Já a ATEP (1996) (Equação (9)) utiliza a área total da junta seca, não separando a resistência total como a soma dessas duas parcelas.

Como a resistência das juntas secas pode ser associada ao modelo da teoria do atrito-cisalhamento e devido à falta de recomendações específicas para o cálculo de juntas secas por parte das normas, a seguir serão apresentadas também equações recomendadas por algumas normas com relação à previsão da resistência ao cisalhamento de interfaces de concreto (modelo teoria do atrito-cisalhamento).

2.3.4.1. AASHTO (1999)

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* para a estimativa da capacidade resistente das juntas secas de pontes segmentadas protendidas recomenda a Equação 8. Na equação, A_k é a área total de cisalhamento

relativa aos dentes, f_c é a resistência à compressão do concreto, σ_n é a tensão confinante e A_{sm} é a área de cisalhamento relativa à parte lisa da junta.

$$V_u = A_k \cdot \sqrt{f_c} (0,9961 + 0,2048 \cdot \sigma_n) + 0,6 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n \quad (8)$$

2.3.4.2. ATEP (1996)

A *Asociación Técnica Española de Pretensado* recomenda a Equação 9 para a estimativa da capacidade resistente das juntas secas de pontes segmentadas protendidas. Na equação, A_j é a área total da junta, σ_n é a tensão confinante e f_{cd} é a resistência de projeto à compressão do concreto.

$$V_u = A_j (1,14 \cdot \sigma_n + 0,0564 \cdot f_{cd}) \quad (9)$$

2.3.4.3. ACI 318-19 (2019)

O *American Concrete Institute – Building Code Requirements and Commentary for Structural Concrete 2019* apresenta a Equação 10 para o cálculo da resistência ao cisalhamento entre faces de uma junta, interface entre dois diferentes materiais ou interface entre dois concretos de diferentes idades. Na equação μ é o coeficiente de fricção, A_{vf} é a área de armadura que atravessa a interface, f_y é a tensão de escoamento do aço e P é uma força de compressão externa transversal à interface de concreto.

$$V_u = \mu (A_{vf} \cdot f_y + P) \quad (10)$$

O ACI 318-19 atribui os seguintes valores para o coeficiente de fricção μ :

- $\mu = 1,4$ para concreto monolítico;
- $\mu = 1,0$ para concreto com interface intencionalmente rugosa;
- $\mu = 0,6$ para concreto com interface não intencionalmente rugosa;
- $\mu = 0,7$ para interface entre concreto e aço.

2.3.4.4. EUROCODE 2 (2004)

O *EuroCode 2: Design of concrete structures* apresenta a Equação 11 para o cálculo da resistência ao cisalhamento de uma interface constituída de concretos de diferentes idades. Nota-se que a equação utilizada pelo EuroCode 2 inclui uma

parcela de coesão. Na equação, c e μ são fatores que dependem da rugosidade, f_{cta} é a resistência à tração do concreto, ρ é a taxa de armadura, f_y é a resistência ao escoamento do aço e σ_n é a tensão de confinamento na interface.

$$V_u = c \cdot f_{cta} + \mu(\rho \cdot f_y + \sigma_n) \quad (11)$$

Esta norma atribui os seguintes valores para os coeficientes c e μ usados nas equações para superfícies:

- muito lisa $c = 0,025$ a $0,10$; $\mu = 0,5$
- lisa $c = 0,20$; $\mu = 0,6$
- rugosa $c = 0,40$; $\mu = 0,7$
- com dentes de cisalhamento $c = 0,50$; $\mu = 0,9$

2.3.4.5. ABNT NBR 6118:2014 (2014)

A Norma Brasileira 6118 de 2014 não apresenta uma equação própria relativa à teoria do atrito-cisalhamento. Na seção 22.5.1.3 da norma é estabelecido que para o cálculo e dimensionamento de consolos, podem ser utilizadas, dentre outras metodologias, a teoria do atrito-cisalhamento, sendo esta mais aplicada a consolos curtos. A norma estabelece ainda na seção 24.5.2 relativa a tensões resistentes de cálculo do concreto simples que a tensão resistente ao cisalhamento, na maioria dos casos, se dá por $0,3f_{cta}$ sendo f_{cta} baseada na resistência à tração inferior do concreto.

2.3.5. Pesquisas relacionadas

Diversas pesquisas a respeito do comportamento mecânico de juntas secas foram realizadas nos últimos anos (BUYUKOZTURK *et al.* (1990), ROMBACH; SPECKER (2002), TURMO *et al.* (2006), YANG *et al.* (2013), ALCADE *et al.* (2013), SHAMASS *et al.* (2015), JIANG *et al.* (2015), KASSEM *et al.* (2017), LIU *et al.* (2019)). Essas pesquisas avaliaram, no geral, a influência da tensão confinante na resistência ao cisalhamento das juntas, o tipo de concreto e a configuração dos dentes.

A seguir serão comentadas as pesquisas mais relevantes sobre o comportamento mecânico de juntas secas.

2.3.5.1. BUYUKOZTURK *et al.* (1990)

Buyukozturk *et al.* (1990) estudaram o comportamento de juntas lisas e juntas possuindo um dente de cisalhamento contendo ou não resina epóxi, tendo como principal variável a tensão confinante.

Os autores confeccionaram corpos-de-prova para avaliar o comportamento de juntas lisas e com dentes de cisalhamento por meio de ensaios *push-off*, utilizando valores de tensão confinante na ordem de 0,69, 2,07 e 3,45 MPa. A resistência à compressão do concreto foi em torno de 50 MPa.

Os resultados mostram que nas juntas secas lisas o deslocamento vertical aumentou linearmente com o incremento da carga até atingir um valor máximo, após isso, o deslocamento aumentou rapidamente e a carga se manteve constante. O coeficiente de fricção μ encontrado pelos autores apresentou valores variados e dependentes da tensão confinante σ_n , sendo eles 0,8, 0,7 e 0,5 para as tensões de 0,69, 2,07 e 3,45 MPa, respectivamente. Verificou-se que a resistência ao cisalhamento nessas juntas aumentou conforme o aumento da tensão confinante.

O mesmo comportamento foi verificado nas juntas lisas com resina epóxi, apresentando estas, maiores valores de resistência. Entretanto observaram que nas juntas secas o tipo de ruptura é dúctil, ao contrário das juntas com resina epóxi, que ocorre de maneira frágil.

Nas juntas secas com um dente observou-se que o deslocamento aumentou linearmente conforme o incremento da carga até uma faixa de 70% da carga máxima, seguido de uma queda na curva. Essa queda foi acompanhada pela formação de uma fissura na base do dente, que se propagou a um ângulo de aproximadamente 45° graus. Com o incremento da carga mais fissuras surgiram e, quando atingida a carga máxima, as fissuras se juntaram e separaram o dente do corpo-de-prova de concreto, acompanhado de um rápido deslocamento. Verificou-se que a resistência ao cisalhamento também aumentou conforme o aumento da tensão confinante.

Assim como nas juntas lisas, a presença de resina epóxi nas juntas com um dente proporcionou valores maiores de resistência, sendo essa diferença na faixa de 25% para a tensão de confinamento de 0,69 MPa e 13% para 3,47 MPa.

Os autores concluíram que a tensão confinante é um parâmetro fundamental para a resistência das juntas, tanto lisas quanto com dentes, sendo a resistência maior conforme o aumento da mesma. A presença de resina epóxi é outro fator que influencia positivamente a resistência das juntas.

Os autores propuseram a Equação 12 para o cálculo da resistência ao cisalhamento das juntas secas possuindo um dente de cisalhamento. Na equação, A_j é a área total da junta, f_c é a resistência à compressão do concreto e σ_n é a tensão confinante.

$$V_u = A_j(0,647\sqrt{f_c} + 1,36\sigma_n) \quad (12)$$

2.3.5.2. ROMBACH e SPECKER (2002)

Rombach e Specker (2002) estudaram o comportamento das juntas secas por meio de uma simulação numérica de elementos finitos, levando em consideração o comportamento não linear devido abertura das juntas.

Verificou-se uma boa concordância entre o modelo numérico de elementos finitos e os resultados experimentais. Com isso, os autores formularam a Equação 13 para prever a resistência ao cisalhamento de juntas secas de concretos de 40 MPa. Na equação, μ é o coeficiente de fricção estabelecido como 0,65, σ_n é a tensão confinante, A_j é a área da junta seca, f é um fator relativo ao recorte dentado dos dentes estabelecido como 0,14, f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto e A_k é a área total de cisalhamento relativa aos dentes.

$$V_u = \mu \cdot \sigma_n \cdot A_j + f \cdot f_{ck} \cdot A_k \quad (13)$$

2.3.5.3. TURMO et al. (2006)

Turmo et al. (2006) avaliaram a resistência ao cisalhamento de juntas secas de acordo com equações encontradas na literatura e propuseram adequar a que mais se aproximou dos resultados experimentais às diretrizes do Eurocode 2. Os autores reuniram resultados de ensaios realizados por outros autores relativos à carga máxima cisalhante em ensaios de ruptura de juntas secas. Em seguida, utilizaram equações encontradas na literatura para prever a resistência desses mesmos ensaios.

Os autores compararam resultados previstos pelas equações da AASHTO (1999), ATEP (1996), Buyukozturk *et al.* (1990) e Fouré *et al.* (1993).

A equação escolhida foi a utilizada pela AASHTO (1999), pois apresentou menor desvio padrão na relação entre os resultados experimentais e os resultados previstos. Adaptando-a para as diretrizes da norma europeia os autores propuseram a Equação 14 para concretos com resistência à compressão inferiores a 50 MPa e a Equação 15 para resistências superiores a 50 MPa. Na equação A_k é a área total de cisalhamento relativa aos dentes, f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão, σ_n é a tensão confinante, A_{sm} é a área de cisalhamento relativa à parte lisa da junta e f_{cm} é a resistência média à compressão do concreto.

$$V_u = A_k \cdot 0,01 \sqrt[3]{f_{ck}^2 \cdot (7\sigma_n + 33)} + 0,6 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n \quad (14)$$

$$V_u = A_k \cdot 0,01 \cdot [\ln(1 + 0,1 \cdot f_{cm})] \cdot (49\sigma_n + 233) + 0,6 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n \quad (15)$$

2.3.5.4. YANG *et al.* (2013)

Yang *et al.* (2013) avaliaram o comportamento de juntas secas de concreto, com resistência à compressão em torno de 60 MPa, analisando várias configurações de dentes e variando a tensão confinante.

Um total de 18 corpos-de-prova do tipo *push-off* foram utilizados no estudo, variando a profundidade dos dentes de cisalhamento em 10 e 20 mm, a inclinação dos mesmos em 45°, 60° e 70° graus e a tensão confinante em 1, 2 e 3 MPa.

Os resultados mostraram que nos corpos-de-prova com dente a 45° o deslocamento e a tensão aplicada variaram linearmente até um valor de 60% do esforço máximo. Após atingir esse valor, ocorreu uma redução na tensão seguido de elevado deslizamento.

Os autores relataram que a fissuração dos corpos-de-prova teve início na base do dente de cisalhamento com o surgimento de fissuras inclinadas. Num segundo momento, fissuras surgiram ao longo do plano de cisalhamento do dente, e no estágio de carga máxima, a fissuração intensiva separou o dente de cisalhamento do corpo-de-prova. Os autores comentam que esse é um comportamento típico da ruptura dita “*shear-off*”.

Em se tratando de tensão confinante, os resultados experimentais mostram que esta influenciou na resistência ao cisalhamento das juntas, sendo maior conforme o aumento da tensão confinante.

Com relação aos dentes, os resultados mostraram que o aumento da inclinação proporcionou o aumento da resistência ao cisalhamento das juntas.

Os autores concluíram que o aumento da resistência ao cisalhamento das juntas secas aumentou conforme o aumento da tensão confinante e do ângulo de inclinação dos dentes.

2.3.5.5. ALCALDE *et al.* (2013)

Alcade *et al.* (2013) avaliaram o comportamento à ruptura de juntas secas analisando a influência do número de dentes de cisalhamento na capacidade resistente das juntas.

Para isso, desenvolveram um estudo em elementos finitos para quatro diferentes tipos de juntas, com um número de dentes variando de um a sete, para prever a resistência ao cisalhamento dessas juntas. Foi desenvolvido um modelo numérico que serviu como base de comparação com os modelos existentes na literatura. O concreto utilizado foi da ordem de 50 MPa. Os autores simularam juntas secas com cinco e sete dentes, variando a tensão confinante em 1, 2 e 3 MPa.

Com os resultados obtidos do modelo, pode-se formular a Equação 16 que estima a resistência das juntas com diferentes números de dentes a diferentes tensões confinantes. Os autores enfatizam que a equação proposta se aplica apenas a concretos de 50 MPa e tensões confinantes abaixo de 3 MPa. Na equação, A_k é a área de cisalhamento relativa aos dentes, N_k é o número de dentes na junta, A_{sm} é a área de cisalhamento relativa à parte lisa da junta e σ_n é a tensão confinante.

$$V_u = 7,118A_k(1 - 0,064N_k) + 2,436 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n(1 + 0,127N_k) \quad (16)$$

Os autores verificaram que a tensão de cisalhamento média na junta, dada pela equação proposta, decai conforme o número de dentes aumenta para uma tensão confinante baixa de 1 MPa. O mesmo não ocorreu para a maior tensão confinante (3 MPa), onde observou-se uma convergência para uma tensão média única.

Os autores comentam que esse comportamento decorre do fato de altas tensões confinantes proporcionarem à junta um comportamento mais plástico dos dentes, podendo, portanto, estes desenvolverem sua capacidade resistente máxima.

Comparando os resultados do modelo e da equação proposta com equações encontradas na literatura, os autores verificaram que a equação usada pela AASHTO (1999) superestima a capacidade resistente das juntas de múltiplos dentes, por outro lado, a equação usada pela ATEP (1996) prevê valores exageradamente conservativos. A equação proposta por ROMBACH and SPECKER (2002) apresentou valores próximos aos resultados numéricos e a proposta por TURMO *et al.* (2006) apresentou valores conservativos.

Os autores concluíram que a tensão de cisalhamento média decai conforme o aumento do número de dentes, porém esse comportamento muda para altas tensões confinantes. Portanto, é válido afirmar que para elevadas tensões confinantes o comportamento da junta é independente do número de dentes. Conseqüentemente, afirmam que para tensões confinantes superiores a 3 MPa, as formulações encontradas na literatura não necessitam levar em consideração nenhum fator que considera a dependência da resistência em relação à quantidade de dentes.

2.3.5.6. SHAMASS *et al.* (2015)

Shamass *et al.* (2015) elaboraram um modelo numérico para avaliar a veracidade dos resultados obtidos com o uso da equação estabelecida pela AASHTO (1999) para a resistência ao cisalhamento de juntas secas.

Os autores utilizaram trabalhos anteriores de Zhou *et al.* (2005) e Buyukozturk *et al.* (1990) para simular seus respectivos corpos-de-prova em um programa de elementos finitos.

A simulação consistiu na aplicação de um deslocamento no topo dos corpos-de-prova possuindo os mesmos valores dos ensaios experimentais. As tensões confinantes aplicadas na lateral dos corpos-de-prova possuíam valores iguais às utilizadas nos experimentos, sendo 1, 2, 3 e 4,5 MPa no caso de Zhou e 0,69, 2,07 e 3,45 MPa para Buyukozturk *et al.* (1990). Os coeficientes de fricção utilizados na simulação numérica foram os mesmos encontrados por Zhou e Buyukozturk, 0,72 e

0,67, respectivamente. Os resultados do modelo numérico proposto demonstraram boa concordância com os resultados experimentais.

Os autores verificaram que uma queda da carga nos gráficos foi devido à falha das juntas do tipo “*shear off*”. Observaram que a tensão cisalhante última aumentou conforme o aumento da tensão confinante na junta. Além disso, uma resistência à compressão alta do concreto proporcionou um valor alto de resistência ao cisalhamento da junta.

Os autores verificaram também o que chamaram de resistência residual da junta, que pode ser entendida como a resistência que permanece na junta rompida após a carga última ser atingida. Isto devido aos mecanismos de atrito-cisalhamento ocorrendo na região fissurada dos dentes rompidos. Verificou-se que essa resistência depende muito da tensão confinante e da resistência à compressão do concreto, sendo maior conforme o aumento de ambas.

Com base nos padrões de fissuração dos corpos-de-prova, observou-se uma tendência da fissuração iniciar na base do dente de cisalhamento a uma carga entre 72 a 80% da carga última e se propagar a um ângulo de 45°. À medida que a carga aumentou mais fissuras surgiram no plano de cisalhamento do dente, até um momento em que todas se interligaram e a ruptura ocorreu. Esse padrão de fissuração é conhecido como “*shear off*”.

Os autores em seguida avaliaram a contribuição da tensão confinante na resistência ao cisalhamento das juntas simulando valores da ordem de 1 a 6 MPa. Verificou-se que a rigidez inicial, deslocamento máximo na ruptura e a carga última de ruptura aumentaram conforme o aumento da tensão confinante.

O padrão de fissuração também sofreu mudança com o incremento da tensão confinante. Os autores comentaram que conforme o confinamento aumenta, o comprimento da fissura originada na base do dente diminui, desaparecendo para tensão confinante de 6 MPa. A propagação da fissura se dá em direção a áreas de baixas tensões, porém, aumentando a tensão confinante, toda zona do dente fica submetida a altas tensões, impedindo a propagação da fissura.

Comparando os resultados numéricos do modelo com os propostos pela equação da AASHTO (1999) os autores verificaram que a resistência ao cisalhamento

da junta seca aumenta conforme o aumento da tensão confinante para ambas formulações, porém, para valores elevados de tensão confinante, a efetividade do ganho de resistência proporcionada pela mesma tende a diminuir. Isso se dá devido ao fato de que as superfícies submetidas a elevadas tensões confinantes perdem parte de sua parcela de fricção devido ao esmagamento das protuberâncias que promovem a rugosidade nessa superfície. Isso se demonstrou verdade pela inspeção das superfícies após o ensaio, que demonstraram uma fina camada de poeira produzida no experimento.

Com isso, os autores recomendam a adoção de um coeficiente de minoração na equação da AASHTO (1999) para valores elevados de tensão confinante.

2.3.5.7. *JIANG et al. (2015)*

Jiang *et al.* (2015) estudaram o comportamento de juntas secas de concreto com resistência à compressão em torno de 50 MPa.

Os principais parâmetros avaliados foram a tensão confinante variando entre 1 e 2 MPa, número, espaçamento e a profundidade dos dentes de cisalhamento variando em 25, 35 e 50 mm. Um total de quinze corpos-de-prova sendo eles lisos, monolíticos, com um dente, dois dentes e três dentes foram testados em ensaios *push-off*.

Duas juntas monolíticas foram ensaiadas sob tensões confinantes variando em 1 e 2 MPa. Observou-se um aumento da resistência ao cisalhamento na faixa de 18,9% na junta submetida à tensão confinante de 2,0 MPa comparada com a submetida à 1 MPa.

Duas juntas lisas foram ensaiadas sob tensões confinantes variando em 1 e 2 MPa. Nenhuma fissura foi observada nas superfícies, que se mantiveram intactas. Observou-se que a tensão de cisalhamento normalizada aumentou linearmente perante a carga até um ponto onde a junta começou a deslizar. Os coeficientes de fricção encontrados pelos autores para essas juntas foram de 0,619 e 0,585 para as tensões de 1 e 2 MPa, respectivamente.

Cinco juntas de um dente foram ensaiadas variando a tensão confinante em 1 e 2 MPa e a profundidade dos dentes em 25, 35 e 50 mm. Verificou-se que o aumento da tensão confinante proporcionou o aumento da resistência ao cisalhamento da junta.

Observou-se também, que o aumento da profundidade dos dentes proporciona valores maiores de resistência ao cisalhamento.

Quatro juntas de dois dentes foram ensaiadas sob diferentes espaçamentos dos dentes. Foi observada uma ductilidade maior dessas juntas perante as juntas de um dente e, observou-se que, o aumento da tensão confinante proporcionou o aumento da resistência ao cisalhamento das juntas. Por outro lado, o aumento da distância dos dentes afetou negativamente a resistência ao cisalhamento das juntas.

Duas juntas de três dentes foram ensaiadas sob tensões confinantes variando em 1 e 2 MPa. O comportamento dessas juntas foi similar aos da junta de dois dentes, diferenciando apenas numa curva mais retilínea para as juntas de três dentes. Assim como nas anteriores, o aumento da tensão confinante proporcionou também o aumento da resistência ao cisalhamento.

No geral, as juntas apresentaram cargas de fissuração na faixa entre 70% a 90% da carga última de ruptura. As juntas de um dente apresentaram valores de carga última aproximadamente 34,8% inferiores aos das juntas monolíticas para tensões confinantes de 1 MPa e 30,4% para tensões confinantes de 2 MPa. As juntas de três dentes apresentaram resistência ao cisalhamento aproximadamente 19,1% inferior ao da junta de um dente para tensões confinantes de 1 MPa e 17,2% para tensões confinantes de 2 MPa. Em se tratando de ruptura das juntas, verificou-se que as juntas de três dentes apresentaram ruptura mais dúctil comparadas às de dois e um dente.

Comparando as juntas, notou-se que nas juntas de dois dentes e três dentes a ruptura se deu de forma sequencial. A sequência de fissuração demonstrou que o dente inferior é o primeiro a ser afetado, indicando que o mesmo é submetido à maiores tensões perante os outros dentes. Os autores formularam ainda um modelo em elementos finitos que comprovou esse fenômeno.

Comparando os resultados experimentais com a fórmula proposta pela AASHTO (1999), para prever a resistência ao cisalhamento da junta, os resultados mostram que para juntas de um dente a equação se demonstra conservativa, porém para juntas de dois e três dentes os valores são superestimados, sendo maior conforme o aumento do número de dentes. Os autores comentam que esses resultados podem ser explicados pelo fato de que a fórmula proposta pela AASHTO

(1999) é derivada da teoria de atrito-cisalhamento e resultados para juntas possuindo apenas um dente. Portanto, eles recomendam atribuir um fator conservativo de 0,7 para o cálculo de juntas de três dentes.

2.3.5.8. KASSEM *et al.* (2017)

Kassem *et al.* (2017) estudaram a capacidade resistente de juntas secas de concreto do tipo “SHCC – *Strain Hardening Cementitious Composites*”.

Esse tipo de concreto é constituído de fibras de alta resistência substituindo os agregados graúdos, o que aumenta significativamente sua resistência à tração e ductilidade.

O programa experimental consistiu na confecção de nove corpos-de-prova para ensaios do tipo *push-off*, tendo como parâmetros avaliados o tipo de concreto, a inclinação do dente de cisalhamento e a tensão confinante. A resistência à compressão do concreto convencional foi em torno de 30 MPa e do concreto SHCC foi de 50 MPa.

Observou-se nas juntas lisas que a relação carga *versus* deslocamento apresentou comportamento linear até atingir uma carga máxima, em seguida, ocorreu um aumento significativo do deslocamento sem incremento de carga. Nenhuma fissura foi verificada nos corpos-de-prova, apenas uma fina camada de poeira devido ao esmagamento das superfícies. Verificou-se também que a carga máxima aumentou conforme o aumento da tensão confinante. O valor do coeficiente de fricção obtido pelos autores foi estabelecido em 0,6.

Nas juntas de um dente verificou-se que as confeccionadas com concreto do tipo SHCC apresentaram maiores valores de resistência ao cisalhamento. Os autores atribuíram esse comportamento às características melhoradas dos concretos SHCC relacionadas com a resistência à compressão e à tração.

Aproximadamente a 45% da carga última dos dentes com concreto de SHCC e 65% de concreto convencional uma fissura apareceu na base do dente e se propagou a um ângulo de 45°. Com o incremento da carga a fissuração aumenta até a ruptura do dente por “*shear off*”. Os resultados mostraram que as juntas de concreto SHCC apresentaram maiores valores de resistência residual após atingida a carga de fissuração, comparada com as juntas de concreto normal.

O aumento do ângulo de inclinação dos dentes foi outro parâmetro que favoreceu a resistência ao cisalhamento das juntas. Os autores comentaram que o aumento da inclinação do dente resultou em uma redução do deslocamento e consequentemente um aumento da resistência ao cisalhamento da junta.

Por fim, os autores compararam a resistência da junta de concreto SHCC com a prevista pela equação da AASHTO (1999). Eles verificaram que as fibras proporcionaram resistência após a fissuração, similar ao efeito de barras de reforço. A equação da AASHTO (1999) não considera esse fenômeno, portanto, os autores propuseram a Equação 17 para o cálculo da resistência de juntas secas constituídas de concreto SHCC. Na equação, A_k é a área total de cisalhamento relativa aos dentes, f_c é a resistência à compressão do concreto e σ_n é a tensão confinante, A_{sm} é a área de cisalhamento relativa à parte lisa da junta e f_{vd} é a resistência à tração do concreto SHCC.

$$V_u = 1,3[A_k\sqrt{f_c}(0,2048 \cdot \sigma_n + 0,9961)] + \mu_r \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n + f_{vd} \cdot A_k/1,15 \quad (17)$$

Os autores atribuíram um coeficiente de 1,3 na equação da AASHTO (1999) pois eles comentam que essa equação leva em consideração um fator de redução de 0,75.

2.3.5.9. LIU *et al.* (2019)

Liu *et al.* (2019) estudaram o comportamento de juntas secas de concreto de ultra alta resistência – UHPC. Um total de vinte e cinco corpos-de-prova de juntas secas em escala real foram testados, incluindo quinze juntas de concreto de alta resistência e dez de outros tipos de concreto. Os principais parâmetros testados foram tipo de concreto, tipo de junta e tensão confinante.

Juntas lisas e juntas de um dente foram usadas para investigar o comportamento ao cisalhamento submetidas à altas tensões confinantes de 6 a 24 MPa, enquanto juntas de três dentes e juntas de dentes largos foram usadas para investigar o comportamento ao cisalhamento submetidas a valores baixos de tensão confinante, da ordem de 1 a 12 MPa. O efeito da armadura de aço no plano de cisalhamento das juntas de dentes largos também foi avaliado. Um método de cálculo

baseado no círculo de Mohr foi testado, assim como um método simplificado. Por fim, os resultados foram comparados com os previstos pela AASHTO (1999).

No total vinte e cinco corpos-de-prova de juntas secas foram testados em ensaios do tipo *push-off*, sendo eles quatro de juntas lisas, dez de um dente, oito de três dentes e três de dentes largos. A tensão de cisalhamento normalizada foi obtida pela Equação 18, que é a força de cisalhamento dividido pela área de cisalhamento, em relação à raiz quadrada de f_c , que considera a influência da variação da resistência do concreto nos corpos-de-prova.

$$\tau_n = \frac{\tau}{\sqrt{f_c}} \quad (18)$$

Os corpos-de-prova de juntas lisas foram testados com tensões confinantes de 6, 12, 18 e 24 MPa. A partir de certo ponto, a deformação aumenta rapidamente, enquanto a tensão cisalhante continua constante ou tem um pequeno aumento. Observou-se que a resistência ao cisalhamento da junta aumentou conforme o aumento da tensão confinante.

Os autores utilizaram a Equação 19 para a obtenção do coeficiente de fricção do concreto.

$$V_u = \mu \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n \quad (19)$$

Os valores encontrados para as juntas foram 0,626, 0,620, 0,595 e 0,571, para a tensão de confinamento de 6, 12, 18 e 24 MPa, respectivamente.

Os corpos-de-prova de um dente foram testados com diferentes parâmetros, sendo eles a tensão confinante, o tipo de concreto, a matriz cimentícia e o conteúdo de fibras. A carga aumentou linearmente com a deformação até atingir a carga de fissuração, numa faixa de 65% a 85% da carga última. Observou-se que a tensão de cisalhamento última aumentou com o aumento da resistência à compressão do concreto e com a adição de fibras.

A resistência ao cisalhamento das juntas também aumentou conforme o aumento da tensão confinante.

Os corpos-de-prova de três dentes foram avaliados com os parâmetros de tensão confinante e tipo de concreto. A carga de fissuração foi em torno de 73% a 95% da carga última.

Os corpos-de-prova de dentes largos foram testados em uma tensão de confinamento de 2,4 MPa e com dois diferentes arranjos de barras. Os corpos-de-prova com armadura reta apresentaram a maior resistência ao cisalhamento, enquanto os corpos-de-prova com armadura contornando o dente apresentaram comportamento parecido com a junta sem armadura até a ruptura, atingida a carga última a armadura proporcionou uma resistência adicional à junta.

Os autores concluíram, portanto, que a capacidade de cisalhamento dos concretos UHPC aumentaram 33,6% quando a taxa armadura de confinamento aumentou de 0,05 para 0,10, 19,4% quando aumentou de 0,10 para 0,15, e 8,3% quando aumentou de 0,15 para 0,20, indicando que a relação entre a capacidade resistente ao cisalhamento das juntas e a tensão confinante são desproporcionais quando a taxa de confinamento apresenta um valor elevado.

Comparando a capacidade resistente da junta de um dente de UHPC com a capacidade resistente da junta de três dentes, verificou-se um fator de redução devido aos múltiplos dentes na faixa de 0,71 e 0,69 para as taxas de confinamento de 0,05 e 0,1, indicando que não existe proporcionalidade na resistência da junta devido à quantidade de dentes.

Por fim os autores propuseram a Equação 20 para o cálculo da resistência ao cisalhamento de juntas secas de concretos de ultra alta resistência. Na equação, A_k é a área de cisalhamento relativa aos dentes, f_c é a resistência à compressão do concreto, σ_n é a tensão confinante, μ é o coeficiente de fricção e A_{sm} é a área de cisalhamento relativa à parte lisa da junta. Nesta equação, os autores recomendam utilizar, para o coeficiente de fricção, um valor de $\mu = 0,6$ quando a taxa de confinamento (ξ) for inferior ou igual a 0,1 e um valor de $\mu = 0,63 - 0,3\xi$, quando for maior que 0,1.

$$V_u = A_k \sqrt{f_c} [0,9 + (0,13 - 2,7 \times 10^{-4} f'_c) \sigma_n] + \mu \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n \quad (20)$$

2.3.5.10. Considerações sobre os trabalhos pesquisados

No geral, em todas as pesquisas anteriores a tensão de confinamento foi um parâmetro muito importante para a resistência das juntas secas, sendo seu aumento benéfico para a resistência ao cisalhamento das mesmas.

A quantidade de dentes nas juntas demonstrou seu aspecto de não proporcionalidade entre as resistências, pois, a generalidade da resistência de uma junta seca com um dente de cisalhamento para uma junta de múltiplos dentes acarreta em valores maiores aos obtidos experimentalmente. Sendo assim, aplicar uma equação proposta para prever a resistência de juntas possuindo um dente para juntas de múltiplos dentes vai contra a segurança.

Os resultados das equações propostas pelos autores diferem bastante entre si. De fato, algumas propriedades influenciam nos resultados finais, como o número de dentes, tipo de concreto e configurações geométricas dos dentes, propriedades estas não comuns para todos os estudos.

O coeficiente de fricção serviu como parâmetro comum para todas as equações. Seu valor varia conforme a tensão confinante e o tipo de concreto, mas no geral aproximou-se de 0,6. A Tabela 1 resume os valores considerados pelos autores.

Tabela 1 - Resumo dos coeficientes de fricção considerados pelos autores, instituições e normas.

Autor / Instituição / Norma	Tipo de concreto	f_c (MPa)	Coeficiente de fricção μ
Buyukozturk <i>et al.</i> (1990)	Convencional	50	0,8 / 0,7 / 0,5
Rombach e Specker (2002)	Convencional	40	0,65
Turmo <i>et al.</i> (2006)	Convencional	50	0,6
Yang <i>et al.</i> (2013)	Alta resistência	60	0,6
Alcade <i>et al.</i> (2013)	Convencional	50	0,72
Shamass <i>et al.</i> (2015)	Convencional e alta resistência	38,7 – 80,1	0,72 / 0,67
Jiang <i>et al.</i> (2015)	Convencional	50	0,619 / 0,585
Kassem <i>et al.</i> (2017)	* SHCC	50	0,6
Liu <i>et al.</i> (2019)	Ultra alta resistência	120	0,626 / 0,620 / 0,595 / 0,571
AASHTO (1999)	-	-	0,6
ACI 318-19 (1996)	-	-	1,4 / 1,0 / 0,6 / 0,7
EUROCODE 2 (2004)	-	-	0,5 / 0,6 / 0,7 / 0,9

* SHCC: “Strain Hardening Cementitious Composites”

As normas internacionais apresentam valores altamente variados pois levam em consideração a rugosidade das diferentes superfícies.

A utilização do concreto convencional é um tema amplamente pesquisado. O estudo da utilização de um novo material na produção dessas juntas é uma tendência aceita.

O concreto produzido com agregados reciclados demonstra ser um material com perspectiva de ser amplamente utilizado no futuro, pois, além de sua produção ser benéfica ao meio ambiente, apresenta comportamento, em parte, semelhante ao concreto convencional.

Devido à falta de pesquisas sobre a utilização desse material em juntas secas faz-se necessário o presente trabalho, portanto, esta pesquisa colabora para o entendimento do comportamento dessas juntas secas quando produzidas com concreto de agregados reciclados.

CAPÍTULO III - PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

O presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de juntas secas confeccionadas com concreto de agregados graúdos reciclados, para isso, foram moldados corpos-de-prova com a presença de dentes de cisalhamento que foram submetidos a ensaios *push-off*. Após o ensaio até a ruptura, foram analisados os seguintes aspectos: o padrão de fissuração, a resistência ao cisalhamento, a resistência residual e o deslizamento entre ambas as partes da junta.

O concreto com agregados graúdos reciclados utilizado nos corpos-de-prova de juntas secas teve resistência à compressão aos 28 dias na faixa de 40 MPa. Suas propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral.

O estudo avaliou as seguintes variáveis:

a) Número de dentes de cisalhamento

O número de dentes numa junta seca é um parâmetro crucial a ser analisado, pois representa uma parcela considerável na resistência ao cisalhamento da junta.

Como visto anteriormente, a resistência das juntas secas se dá por uma combinação entre a resistência ao cisalhamento da parte lisa da junta com a parte dos dentes.

Na parte lisa da junta existe uma condição de cisalhamento entre duas interfaces de concreto, predominando a teoria do atrito cisalhamento. A resistência se dá em função do coeficiente de fricção (μ), que em concretos convencionais possui o valor de 0,6.

Para a obtenção do coeficiente de fricção dos concretos reciclados foram confeccionados corpos-de-prova lisos, sem dentes de cisalhamento, submetidos a ensaios *push-off* sob diferentes tensões confinantes.

Obtido o valor do coeficiente de fricção desses concretos, uma análise a respeito da parcela de resistência dos dentes de cisalhamento foi efetuada.

Para isso, foram confeccionados corpos-de-prova de junta seca possuindo um dente e três dentes de cisalhamento, que foram submetidos a ensaios *push-off*. Analisando assim o deslizamento, fissuração e carga última.

b) Tensão de confinamento

A tensão confinante aplicada às superfícies de concreto em contato nas juntas secas e nos dentes de cisalhamento é um dos principais parâmetros responsáveis pela resistência dessas juntas.

Sabe-se que o aumento do seu valor possibilita ganhos de resistência, devido principalmente aos mecanismos de fricção nas superfícies em contato e à mudança no estado plano de tensão nos dentes de cisalhamento.

Sendo assim, diferentes tensões de confinamento na faixa de 1, 2 e 3 MPa foram aplicadas nos corpos-de-prova para a análise da sua contribuição na resistência ao cisalhamento das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados.

3.2. Materiais

Os materiais utilizados foram os seguintes: água, cimento, areia, agregados graúdos reciclados e armaduras de aço.

3.2.1. Água

A água utilizada é proveniente da rede de distribuição da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ, tratada pela empresa Águas do Paraíba. Serviu para preparação dos concretos.

3.2.2. Cimento

Foi utilizado um cimento Portland CII E 32 para produção dos corpos-de-prova.

3.2.3. Areia

Utilizou-se areia de rio lavada, proveniente do Rio Paraíba do Sul na cidade de Campos dos Goytacazes – RJ. A areia foi secada a 100 °C e, após a secagem, utilizada como agregado miúdo dos concretos.

3.2.4. Agregados graúdos

O agregado graúdo reciclado foi obtido por britagem de corpos-de-prova já utilizados em trabalhos anteriores pelos pesquisadores do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LECIV/UENF), objetivando granulometria semelhante às britas 0 e 1.

A faixa de resistência à compressão do concreto convencional do qual se utilizou para a produção do agregado graúdo reciclado foi de 50 a 70 MPa.

Portanto, o agregado graúdo reciclado possuiu resistência superior à matriz cimentícia do concreto.

3.2.5. Armaduras de aço

As armaduras de aço utilizadas foram CA-50 com diâmetro nominal de 8,0 e 12,5 mm. Estas foram utilizadas para confecção dos corpos-de-prova do tipo *push-off* como armadura auxiliar, permitindo que os mesmos não se rompessem prematuramente devido ao surgimento de tensões em outros pontos da peça.

3.3. Produção dos agregados reciclados

Os agregados reciclados foram armazenados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LECIV/UENF).

Nos itens abaixo serão descritas as etapas que constituíram o processo de produção dos agregados reciclados.

3.3.1. Coleta do concreto a ser reciclado

Os concretos utilizados para a produção dos agregados reciclados foram obtidos da britagem de corpos-de-prova já utilizados em pesquisas anteriores, e encontravam-se armazenados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LECIV/UENF).

3.3.2. Britagem

O equipamento utilizado para a produção dos agregados reciclados foi um britador de mandíbulas de dois eixos tipo Blake, da marca Fritsch que possui a

compressão como principal mecanismo de funcionamento. A Figura 22 mostra o britador utilizado.



Figura 22 - Britador de mandíbulas de dois eixos.

Os corpos-de-prova passaram por um processo de redução de tamanho antes de sofrerem a britagem, pois a abertura do local de alimentação do britador era pequena. Utilizou-se de uma prensa manual para fragmentar os corpos-de-prova e posteriormente foi necessário o uso de uma marreta para atingir o tamanho requerido.

Devido às características do britador e visando o não desperdício de material, escolheu-se para o tamanho de brita uma combinação de brita 0 e 1 para os agregados reciclados.

3.3.3. Peneiramento

Buscando-se a produção de brita 0 e 1, o peneiramento foi realizado com o auxílio de peneiras granulométricas quadradas com 500 x 500 x 100 mm, com aberturas de 19,0 e 4,75 mm.

O equipamento era um peneirador elétrico da marca Pavitest[®], onde as peneiras foram encaixadas, e a vibração produzida pelo equipamento permitiu a divisão das diferentes frações de agregado. O material retido na peneira de 4,75 mm e passante na peneira de 19 mm foi aproveitado para a pesquisa, enquanto a fração fina foi descartada. O material não passante na peneira de 19 mm foi rebitado e submetido a novo processo de peneiramento.

3.3.4. Armazenagem

Após o peneiramento, os agregados reciclados foram armazenados em local seco e livre de umidade. A Figura 23 mostra o material armazenado no LECIV/UENF.



Figura 23 - Armazenagem do agregado reciclado.

3.4. Caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados possibilitou a obtenção de suas propriedades. Além disso, devido a esta etapa ter grande importância para a dosagem do concreto com agregados graúdos reciclados, foi possível o conhecimento das propriedades físicas essenciais para o estudo de dosagem.

3.4.1. Composição granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248 (2003).

Realizado o ensaio, seguidamente foram confeccionadas as curvas granulométricas dos agregados graúdos reciclados.

A Figura 24 mostra os equipamentos para realização do ensaio de granulometria dos agregados graúdos reciclados.



Figura 24 – Ensaio de granulometria dos agregados reciclados.

3.4.2. Massa específica real, massa específica unitária e massa específica aparente

A massa específica real dos agregados miúdos foi determinada de acordo com a ABNT NBR NM 52 (2003).

A massa específica real e aparente dos agregados graúdos foi determinada conforme a ABNT NBR NM 53 (2002).

Já a massa específica unitária dos agregados, tanto miúdos quanto graúdos, foi determinada de acordo com a ABNT NBR NM 45 (2006).

A Figura 25 mostra o ensaio de massa específica real e unitária dos agregados reciclados.



Figura 25 - Ensaio de massa específica real e massa específica unitária dos agregados reciclados.

3.4.3. Absorção de água

A absorção de água dos agregados graúdos foi determinada conforme estabelece a ABNT NBR NM 53 (2002).

3.4.4. Ensaio de abrasão Micro-Deval

O desgaste superficial dos agregados graúdos reciclados foi medido por meio do ensaio de abrasão Micro-Deval, conforme as recomendações da europeia EN 1097-1:2011. A Figura 26 mostra o equipamento utilizado no ensaio.



Figura 26 - Equipamento de ensaio de abrasão Micro-Deval.

3.4.5. Quantidade de argamassa aderida ao agregado graúdo reciclado

Para a determinação da quantidade de argamassa antiga aderida ao agregado reciclado foi realizado um procedimento adaptado de BAZUCO (1999).

O ensaio consistiu em utilizar ácido sulfúrico, com concentração de 20%, proporcionando um ataque ácido à argamassa.

Inicialmente foram separadas amostras de agregado de 300g para serem secadas em estufa com temperatura de 100 °C até a constância de massa. Em seguida, as amostras foram pesadas e imersas em solução de ácido sulfúrico até a completa desagregação da argamassa dos agregados. Posteriormente, os agregados foram lavados com água corrente, para total retirada da argamassa aderida. O material, portanto, foi levado novamente para a estufa até que se observou constância de massa e então pesado.

A diferença de massa antes e após o ataque ácido possibilitou a determinação da porcentagem de argamassa aderida ao agregado reciclado.

A Figura 27 mostra os agregados reciclados submetidos ao ataque ácido.



Figura 27 - Ataque ácido nos agregados reciclados.

3.5. Dosagem dos concretos

Os concretos com agregados graúdos reciclados foram dosados com o intuito de alcançar resistências à compressão na faixa de 30 MPa aos 28 dias. Para isso, foi preciso adicionar 5% a mais de cimento em peso no traço de um concreto natural de referência, como proposto em MARINKOVIĆ *et al.* (2010), com previsão da resistência à compressão aos 28 dias na ordem de 30 MPa.

No momento da produção dos concretos com agregados reciclados os agregados reciclados passaram por um processo de pré-saturação, como recomenda alguns autores (RIAZ *et al.*, 2015, NAOUAOUI *et al.*, 2019, KHATAB; ALTMAMI, 2019), para evitar que o agregado absorva parte da água de amassamento do concreto.

A Tabela 2 mostra a dosagem dos concretos com agregados graúdos reciclados.

Tabela 2 - Dosagem do concreto com agregados graúdos reciclados.

Material	Dosagem
Cimento (kg/m ³)	513,59
Água (kg/m ³)	236,25
Agregado graúdo reciclado (kg/m ³)	904,00
Agregado miúdo (kg/m ³)	735,85
Relação a/c	0,46

3.6. Confeção das Fôrmas

Foram confeccionadas fôrmas de madeira para produção dos corpos-de-prova de junta seca, utilizando latão no molde do contorno dos dentes, como mostra a Figura 28.



Figura 28 - Fôrmas de madeira para produção dos corpos-de-prova.

3.7. Características dos corpos-de-prova

Um total de 27 corpos-de-prova foram moldados, sendo nomeados conforme as variáveis analisadas, com a seguinte nomenclatura:

CPRX - J - T

onde:

CPR: Corpo-de-prova de junta seca de concreto com agregados graúdos reciclados;

X: Numeração do corpo-de-prova;

J: Tipo de junta: (L) Lisa; (1) Um dente; (3) Três dentes;

T: Tensão de confinamento aplicada (1,0; 2,0; 3,0 MPa).

Por exemplo, o corpo-de-prova CPR1-1-2,0 indica o corpo-de-prova 1 de junta seca de concreto com agregados graúdos reciclados, possuindo um dente de cisalhamento e submetida à uma tensão de confinamento de 2,0 MPa.

Na Tabela 3 mostra-se um resumo dos corpos-de-prova utilizados neste trabalho.

Tabela 3 - Resumo dos corpos-de-prova.

Corpos-de-prova	Tipo de junta	Tensão confinante (MPa)
CPR1-L-1,0	Lisa	1,0
CPR2-L-1,0	Lisa	1,0
CPR3-L-1,0	Lisa	1,0
CPR1-L-2,0	Lisa	2,0
CPR2-L-2,0	Lisa	2,0
CPR3-L-2,0	Lisa	2,0
CPR1-L-3,0	Lisa	3,0
CPR2-L-3,0	Lisa	3,0
CPR3-L-3,0	Lisa	3,0
CPR1-1-1,0	Um dente	1,0
CPR2-1-1,0	Um dente	1,0
CPR3-1-1,0	Um dente	1,0
CPR1-1-2,0	Um dente	2,0
CPR2-1-2,0	Um dente	2,0
CPR3-1-2,0	Um dente	2,0
CPR1-1-3,0	Um dente	3,0
CPR2-1-3,0	Um dente	3,0
CPR3-1-3,0	Um dente	3,0
CPR1-3-1,0	Três dentes	1,0
CPR2-3-1,0	Três dentes	1,0
CPR3-3-1,0	Três dentes	1,0
CPR1-3-2,0	Três dentes	2,0
CPR2-3-2,0	Três dentes	2,0
CPR3-3-2,0	Três dentes	2,0
CPR1-3-3,0	Três dentes	3,0
CPR2-3-3,0	Três dentes	3,0
CPR3-3-3,0	Três dentes	3,0

Foram confeccionadas três réplicas para cada classe de corpo-de-prova, resultando num total de 27 corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova possuíram espessura de 10 cm e utilizou-se duas camadas de armaduras com diâmetro nominal de 12,5 mm. Os detalhes dos corpos-de-prova de junta estão ilustrados na Figura 29.

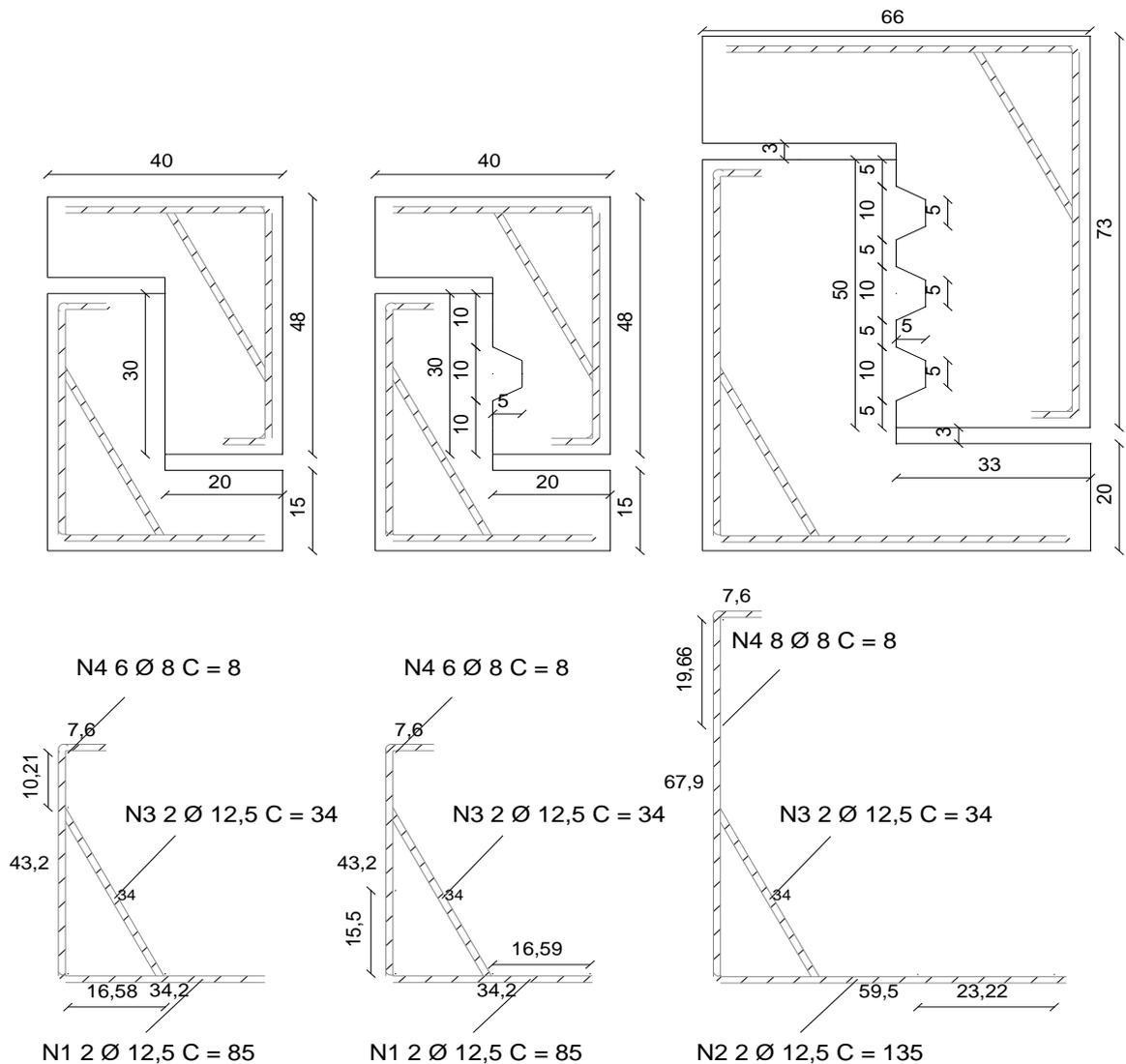


Figura 29 - Detalhe dos corpos-de-prova de junta seca: a) lisa, b) com um dente e c) com três dentes (unidades em cm).

A Tabela 4 reúne informações a respeito das armaduras utilizadas nos corpos-de-prova de junta seca.

Tabela 4 - Informações da armadura utilizada nos corpos-de-prova de junta seca com um e três dentes de cisalhamento.

Tipo	Aço	Ø (mm)	Comprimento unitário (cm)	Quantidade	Comprimento total (cm)
N1	CA-50	12,5	85	4	340
N2	CA-50	12,5	135	4	540
N3	CA-50	12,5	34	4	136
N4	CA-50	8	8	12/16	96/128

A Figura 30 mostra uma ilustração das armaduras utilizadas em ambas as partes dos corpos-de-prova de juntas secas.

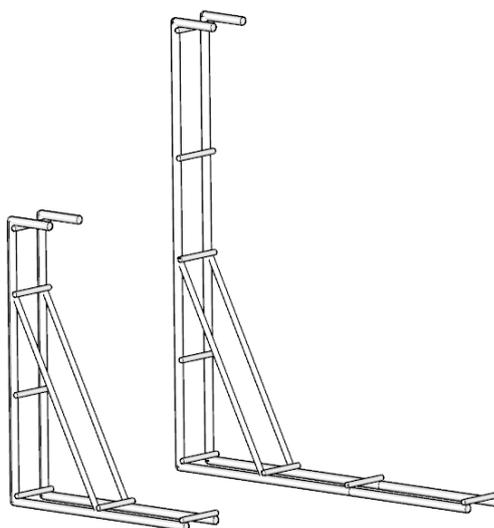


Figura 30 - Armaduras utilizadas em ambas as partes dos corpos-de-prova de juntas secas.

3.8. Produção dos corpos-de-prova

Para a produção dos corpos-de-prova foi utilizada uma betoneira com capacidade de 400 L. O procedimento foi o mesmo adotado por Trindade (2017), seguindo as seguintes etapas:

- umedecimento da betoneira com água;
- adição dos agregados reciclados;
- adição da metade da água com homogeneização por 1 minuto;
- repouso por 10 minutos, com a betoneira desligada, para que os agregados absorvessem parte da água;
- acréscimo do cimento com homogeneização por 30 segundos;
- adição da areia e da outra metade da água com homogeneização por 2 minutos.

Os corpos-de-prova foram confeccionados em duas etapas. A primeira etapa (Figura 31), remete à concretagem da parte fêmea da junta, a qual possui o encaixe do dente de cisalhamento. Após 24 horas da concretagem a segunda etapa foi concretada (Figura 32), utilizando a parte fêmea como molde para a parte macho do dente de cisalhamento, fazendo uso de óleo lubrificante semissintético para impedir a solidarização entre as partes. Esse procedimento garantiu um perfeito encaixe entre as duas partes da junta (Figura 33). Por fim, após 24 horas da concretagem, efetuou-se a desforma e separação das juntas (Figura 34).

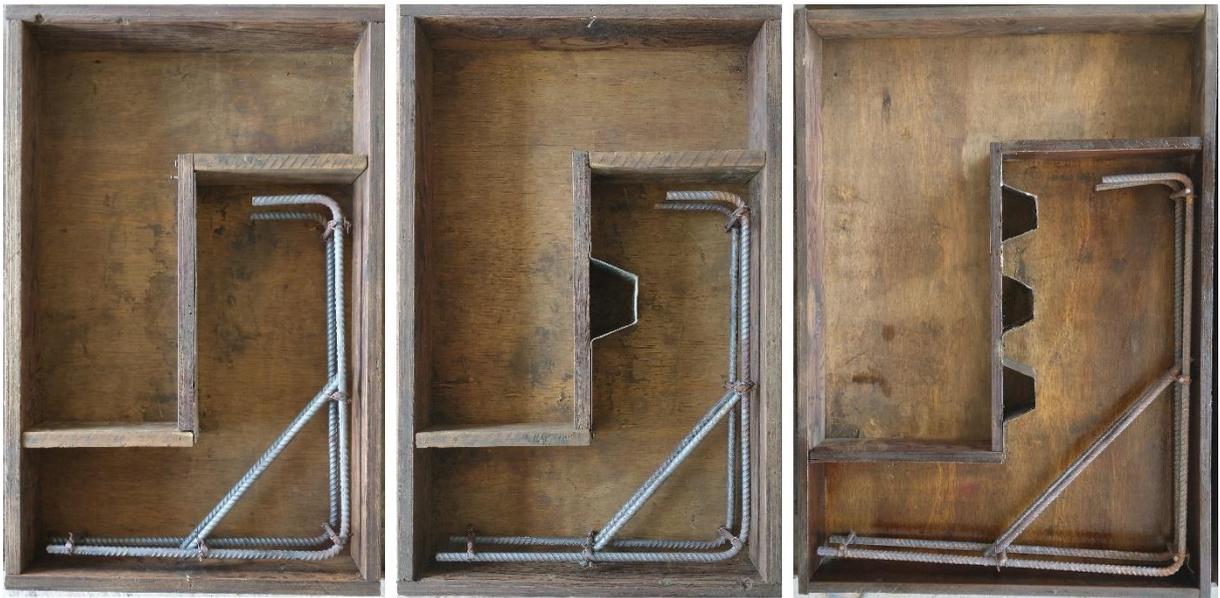


Figura 31 - Primeira etapa da concretagem dos corpos-de-prova com dentes de cisalhamento.



Figura 32 - Segunda etapa da concretagem dos corpos-de-prova com dentes de cisalhamento.



Figura 33 – Garantia do perfeito encaixe entre os dentes de cisalhamento.



Figura 34 - Desmoldagem e separação das duas partes da junta seca com dentes de cisalhamento.

3.9. Caracterização do concreto com agregados graúdos reciclados no estado endurecido

3.9.1. Resistência à compressão

Para os ensaios de resistência à compressão, foram confeccionados 9 corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura e seguiu-se as recomendações da ABNT NBR 5739 (2018).

Os corpos-de-prova cilíndricos foram rompidos na mesma data do ensaio de ruptura *push-off* das juntas secas, com cerca de um a dois meses após a concretagem.

3.9.2. Resistência à tração por compressão diametral

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, foram confeccionados 9 corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura e seguiu-se as recomendações da ABNT NBR 7222 (2011). A Figura 35 ilustra o esquema de ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto com agregados graúdos reciclados.



Figura 35 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral por compressão diametral.

3.9.3. Módulo de elasticidade

Para a obtenção do módulo de elasticidade do concreto com agregados graúdos reciclados foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 8522 (2017). A Figura 36 mostra o esquema de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto com agregados graúdos reciclados.



Figura 36 - Ensaio para a determinação do módulo de elasticidade do concreto.

3.9.4. Densidade, porosidade e absorção de água

Para os ensaios de densidade, porosidade e absorção de água dos concretos reciclados seguiu-se as recomendações da ABNT NBR 9778 (2005).

3.9.5. Microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados

Para o ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados foi utilizado o Microscópio Confocal a Laser da LEXT™ OLS4000. A Figura 37 mostra o microscópio utilizado.



Figura 37 - Ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.

Foram recolhidas amostras da superfície dos dentes de cisalhamento e da parte lisa das juntas, para medição dos parâmetros de rugosidade do concreto com agregados graúdos reciclados nessas regiões. A Figura 38 mostra as regiões que foram ensaiadas.

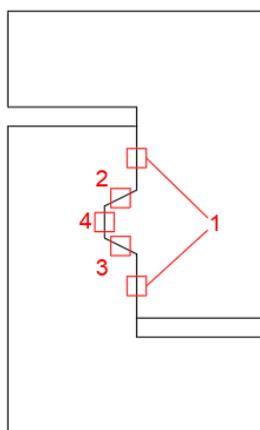


Figura 38 - Regiões analisadas no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.

onde:

- 1: região lisa;
- 2: região superior do dente;
- 3: região inferior do dente;
- 4: região mediana do dente

3.10. Instrumentação e procedimentos de ensaios *push-off*

Para os ensaios de ruptura do tipo *push-off* foi utilizado um pórtico metálico e um atuador hidráulico modelo 244.41, acoplado a uma célula de carga, com capacidade de 500 kN da MTS®, os ensaios foram realizados com deformação controlada, com velocidade de 1 mm/min, comandados pela unidade hidráulica que registrou em tempo real o carregamento aplicado.

Para o sistema de confinamento montou-se um *setup* onde a tensão confinante foi produzida pela compressão lateral entre duas chapas metálicas. Um sistema de quatro barras de aço rosqueadas foram utilizadas para produzir uma força de reação nessas chapas, por via de porcas, que conseqüentemente, produziram o confinamento lateral nos corpos-de-prova. Para transferência da tensão de confinamento entre chapas utilizou-se roletes de aço, que possibilitaram o deslocamento vertical dos corpos-de-prova.

A tensão de confinamento que as chapas produziram foi calculada pela relação entre a somatória das forças de reação das barras rosqueadas pela área do plano de cisalhamento das juntas secas. Conhecendo a força necessária em cada barra rosqueada, pode-se calcular a respectiva deformação necessária. A Tabela 5 reúne essas informações.

Tabela 5 - Valor das forças necessárias em cada barra para a produção das tensões de confinamento.

Tipo de junta seca	Área do plano de cisalhamento (mm ²)	Forças necessárias em cada barra (kN) *
Lisa	30000	7,5 / 15,0 / 22,5
1 dente	30000	7,5 / 15,0 / 22,5
3 dentes	50000	12,5 / 25,0 / 37,5

* Para as tensões de confinamento de 1 / 2 / 3 MPa respectivamente.

A Figura 39 mostra as barras de aço rosqueadas utilizadas no sistema de confinamento. Devido à magnitude da força resultante necessária para aplicação das

tensões de confinamento, o diâmetro nominal utilizado nas barras de aço foi de 15 mm.

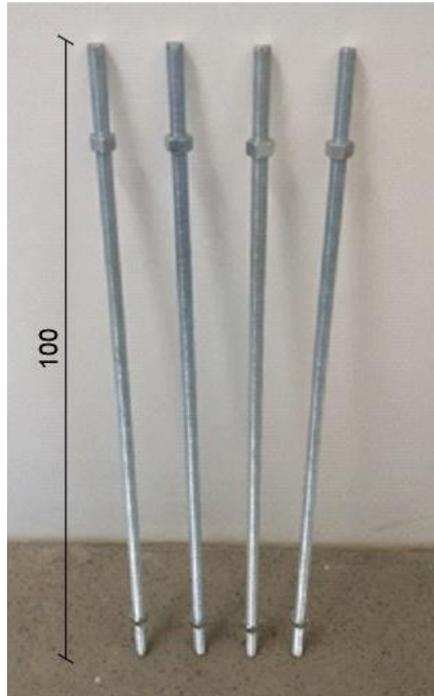


Figura 39 - Barras de aço rosqueadas utilizadas no sistema de confinamento (unidades em cm).

As barras de aço foram instrumentadas com medidores de deformação *strain gauges* BX120-3AA, com mostra a Figura 40, para monitoramento em tempo real de suas deformações.



Figura 40 - Barras de aço rosqueadas instrumentadas com *strain gauges*.

Foram utilizadas porcas de aço com diâmetro compatível à 15 mm, como mostra a Figura 41, para o rosqueamento das barras de aço.



Figura 41 - Porcas de aço compatíveis com as barras de aço de 15 mm utilizadas no sistema de confinamento.

A Figura 42 mostra as chapas utilizadas para produção da tensão de confinamento nos corpos-de-prova. As chapas eram suficientemente rígidas.



Figura 42 - Chapas de aço utilizadas no sistema de confinamento (unidades em cm).

Um esquema detalhado do sistema de confinamento está ilustrado na Figura 43.

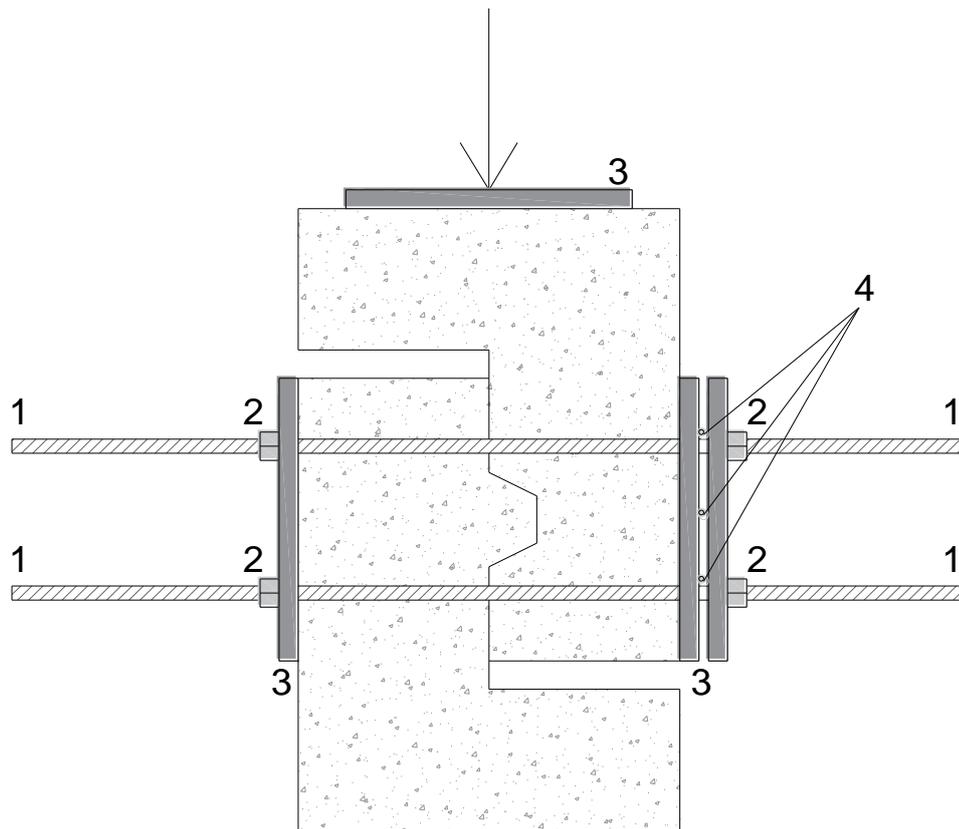


Figura 43 - Esquema do sistema de aplicação da tensão de confinamento.

onde:

- 1: Barras de aço rosqueadas;
- 2: Porcas de aço;
- 3: Chapas de aço;
- 4: Rolletes de aço.

A Figura 44 mostra o sistema de confinamento nos diferentes tipos de juntas secas.

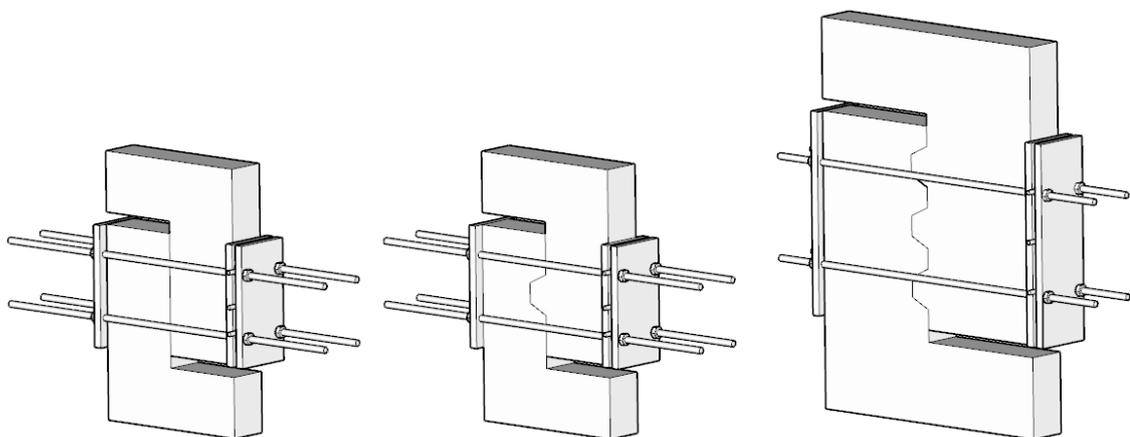


Figura 44 - Ilustração do sistema de confinamento instalado nos corpos-de-prova de junta seca: a) lisa, b) com um dente e c) com três dentes.

A Figura 45 mostra o sistema de confinamento instalado em um corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento.



Figura 45 - Sistema de confinamento instalado em um corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento.

3.11. Análise de deslocamentos via Correlação de Imagem Digital – CID

A Correlação de Imagem Digital (CID), do inglês *Digital Image Correlation* (DIC), utiliza técnicas de processamento digital, óptica-numérica, que permitem obter a medição de deslocamentos de um objeto em regiões de interesse sujeito a solicitações mecânicas.

A diferença entre CID e as outras técnicas de medição convencionais é que ela permite a medição de modo não invasivo e com um baixo custo-benefício. Ela é uma técnica aplicada na engenharia civil, engenharia mecânica, ciências dos materiais e na engenharia biomédica, entre outras. Com isso, pode ser usada e adaptada às mais diversas situações de medição, permitindo o processamento de um número elevado de imagens com rapidez e precisão. Além disso, é uma técnica adequada às dimensões da região de interesse deste trabalho.

A CID é uma técnica óptica de medição de campos de deslocamentos na superfície (quase) plana de um corpo a analisar. A superfície do corpo-de-prova deve possuir um padrão que funciona como marcador local da superfície a analisar. Os deslocamentos são medidos por comparação de duas imagens, retiradas antes e após a aplicação de uma solicitação no espécime. A imagem inicial é dividida em sub-regiões ou janelas de correlação, sendo o padrão de intensidade de luz local usado num critério de correlação para a determinação da sua transformação (por exemplo, homogênea). Através desta técnica é obtido um valor de deslocamento para cada janela de correlação na imagem, pelo que a sua dimensão define a resolução espacial (menor distância entre duas medições independentes) desta técnica (PEREIRA et al, 2010).

Para a criação do padrão na superfície de análise dos CPs utilizou-se tinta branca para cobrir toda a região de interesse de forma a obter-se uma superfície de base completamente opaca. Posteriormente, com um spray de cor preta, pulverizou-se aleatoriamente sobre a base da pintura branca inicial. O recurso ao spray para este tipo de marcação é conveniente, dado que possibilita a obtenção de um tamanho de grão relativamente uniforme e de dimensão adequada à escala de observação.

Para capturar a sequência de fotos de cada corpo-de-prova foi utilizado o aplicativo para *Windows* chamado *digiCamControl*. Com este foi possível controlar parâmetros de disparo da câmera, além de transferir imagens diretamente para o computador que também permitiu visualizar as imagens resultantes exibidas na tela do computador, foi configurada a máquina para uma frequência de aquisição de 0,5Hz, ou seja, 1 imagem a cada 2 segundos.

Para análise de Correlação de Imagem Digital foi utilizado o aplicativo para *Windows* chamado *GOM Correlate 2020*. A análise se baseou na inserção de pontos na malha projetada nos corpos-de-prova e seus respectivos deslocamentos. Com isso, permitiu-se calcular as deformações e deslocamentos desses pontos em relação à carga aplicada.

A Figura 46 mostra o esquema de ensaio CID das juntas secas durante o ensaio *push-off*.



Figura 46 - Ensaio *push-off* das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados em conjunto com a análise CID.

3.12. Utilização do software *GOM Correlate 2020* na análise CID

O *software* utilizado para a análise CID foi o *GOM Correlate 2020*, que permitiu o estudo do deslocamento vertical das juntas secas, bem como o deslizamento entre ambas as partes das juntas e a abertura das fissuras.

Os parágrafos a seguir serão dedicados à uma breve apresentação do programa e um resumo de como foram feitas as análises.

A Figura 47 mostra a interface inicial de análise do *GOM Correlate 2020*.

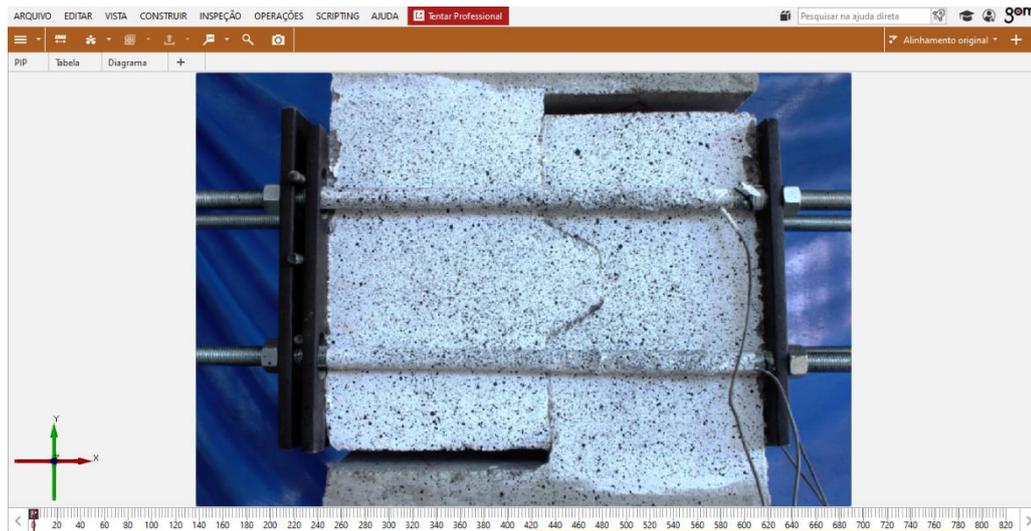


Figura 47 - Interface inicial de análise do GOM Correlate 2020.

No primeiro estágio da análise, as imagens capturadas pela câmera no decorrer do ensaio *push-off* são reunidas no programa e postas em sequência. Em seguida cria-se um Componente de Superfície com o intuito de estabelecer uma área de análise geral. Nessa etapa certas condições de projeto são estabelecidas, como as medidas e escalas dos corpos-de-prova, por exemplo.

Na Figura 48 observa-se um Componente de Superfície criado no corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento.

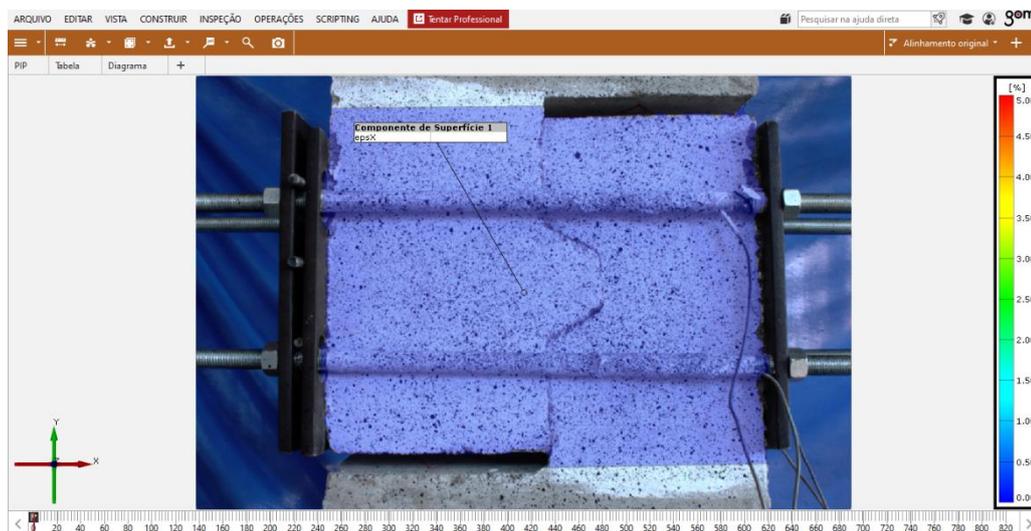


Figura 48 - Componente de Superfície criado na análise de um corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento.

O Componente de Superfície permite a realização de análises mais amplas no corpo-de-prova, como os deslocamentos, deformações, dentre outras. A Figura 49

mostra as possibilidades de análises no Componente de Superfície criado no corpo-de-prova.

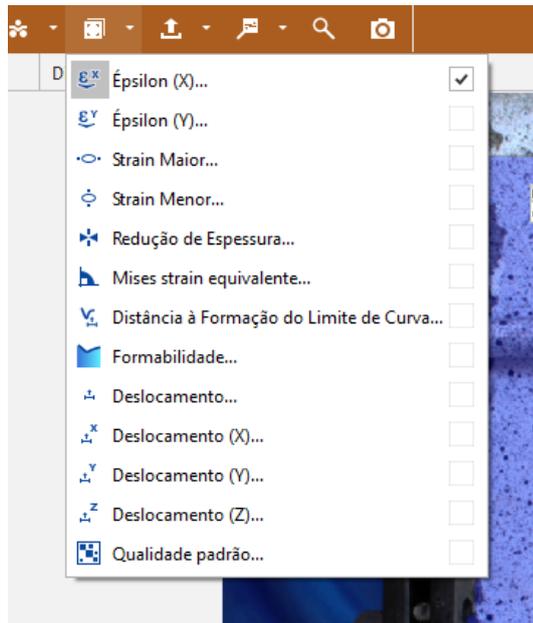


Figura 49 - Possibilidades de análises no Componente de Superfície.

Para o estudo da cinética de fissuração nos corpos-de-prova escolheu-se a análise da deformação no eixo horizontal do Componente de Superfície (*Épsilon X*), visto que, as fissuras, em sua grande maioria, ocorrem em uma amplitude entre 45 e 90 graus em relação à horizontal.

O *software* permite o uso de ferramentas de criação para análises mais específicas, como deslocamentos e deformações pontuais. A Figura 50 mostra as ferramentas presentes no programa.

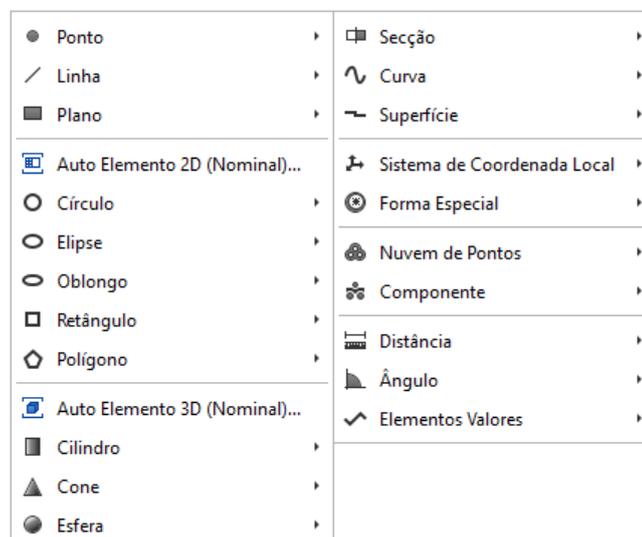


Figura 50 - Ferramentas de criação presentes para as análises no *GOM Correlate 2020*.

Para a análise dos deslocamentos verticais das juntas secas utilizou-se da criação de Pontos e Distâncias.

De início, foram criados pontos em cada lado do plano de cisalhamento dos corpos-de-prova. Esses pontos foram cuidadosamente dispostos com o intuito de apresentarem a mesma localização no eixo vertical (mesma altura), com isso, a distância vertical para cada par de pontos criados foi nula no estágio antes do carregamento. A Figura 51 mostra a disposição dos pontos em uma análise de junta seca com um dente de cisalhamento.

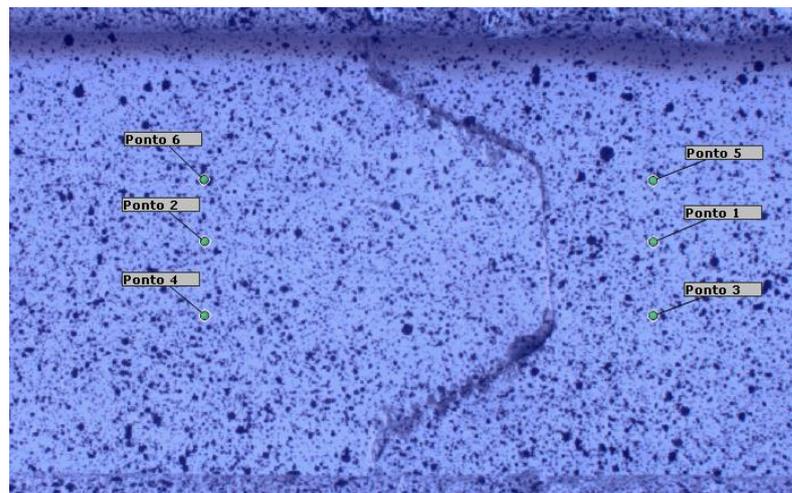


Figura 51 - Disposição dos pontos em cada lado do plano de cisalhamento em uma análise de junta seca com um dente.

Em seguida, criou-se uma distância entre os pares de pontos, como mostra a Figura 52.

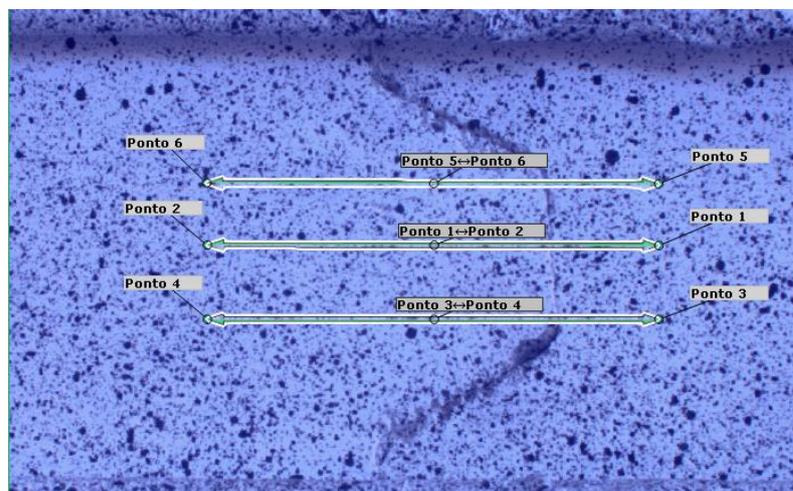


Figura 52 - Utilização da ferramenta "Distância" no GOM Correlate 2020.

Com isso, pôde-se efetuar uma análise da distância no eixo vertical entre dois pares de pontos. Essa distância vertical leva em consideração os deslocamentos de ambos os pontos, ou seja, se os dois pontos deslocarem verticalmente, a distância vertical dos mesmos será o valor calculado entre o ponto que apresentou o maior deslocamento subtraído pelo ponto que apresentou o menor deslocamento. Essa análise permitiu a obtenção dos deslizamentos entre ambas as partes das juntas secas. A Figura 53 mostra o deslizamento entre ambas as partes de uma junta seca com um dente de cisalhamento em certo instante de um ensaio de ruptura *push-off*.

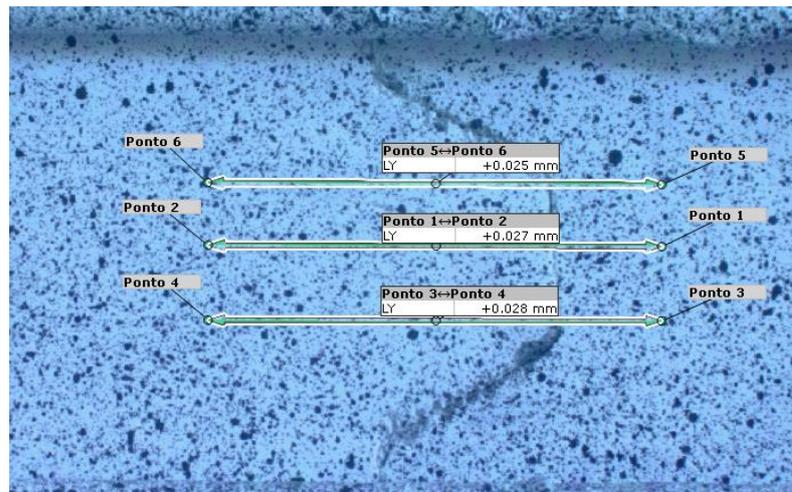


Figura 53 - Distância vertical entre pares de pontos em certo instante de um ensaio *push-off* de junta seca de um dente.

Por fim, o estudo da abertura de fissuras se baseou na análise da distância relativa entre dois pontos perpendiculares à abertura das fissuras, como mostra a Figura 54.

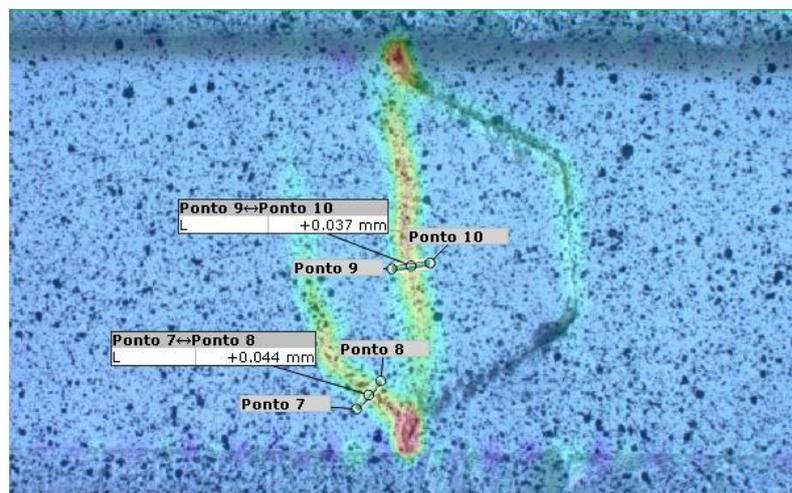
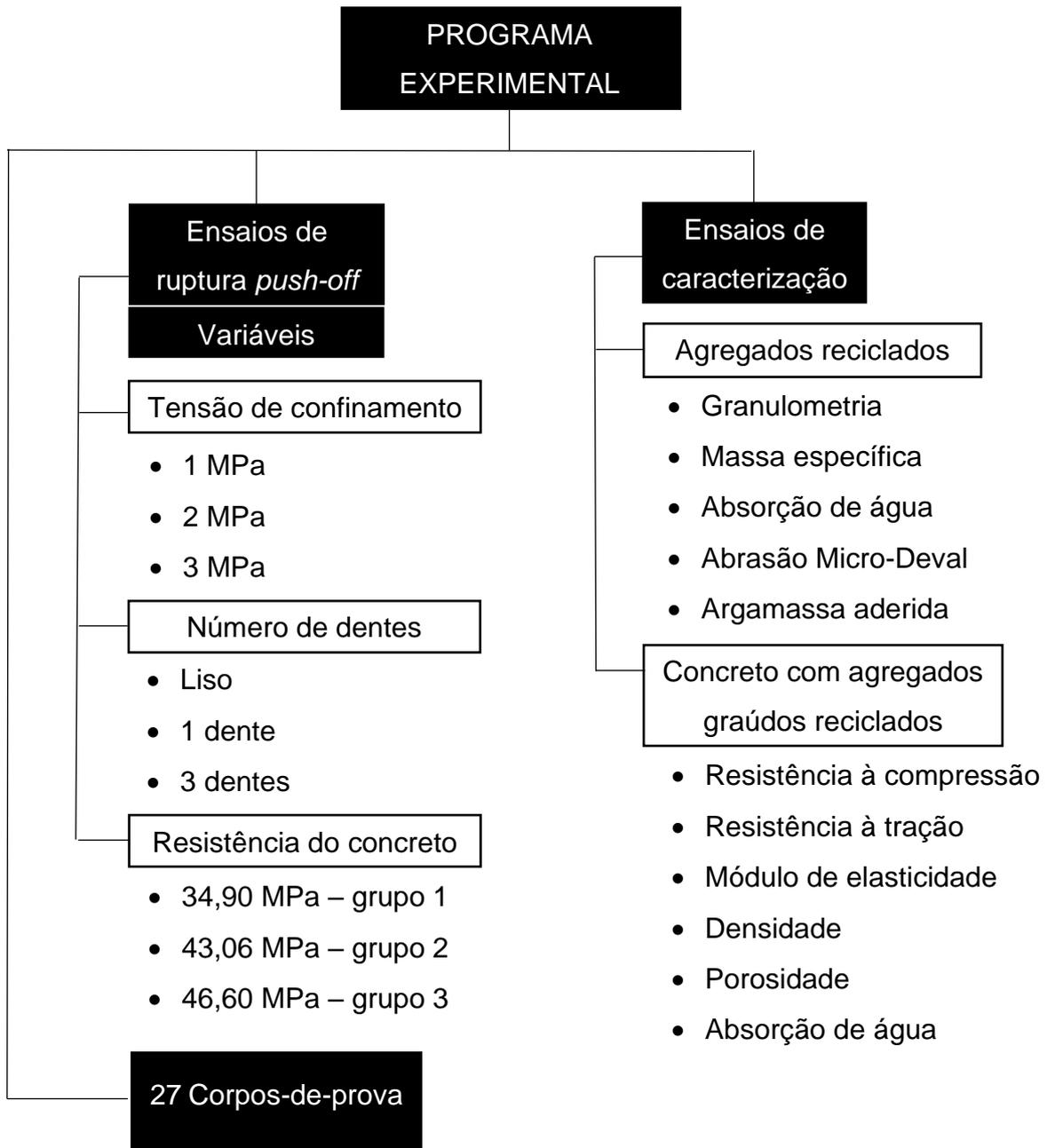


Figura 54 - Distância relativa entre pares de pontos para análise da abertura de fissuras.

3.13. Fluxograma do programa experimental



27 Corpos-de-prova

- Lisa

grupo 1 — 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa

grupo 2 — 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa

grupo 3 — 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa

- 1 dente

grupo 1 — 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa

grupo 2 — 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa

grupo 3 — 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa

- 3 dentes

grupo 1 — 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa

grupo 2 — 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa

grupo 3 — 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização do aço do sistema de confinamento

O resultado do ensaio de tração das barras rosqueadas está ilustrada na Figura 55.

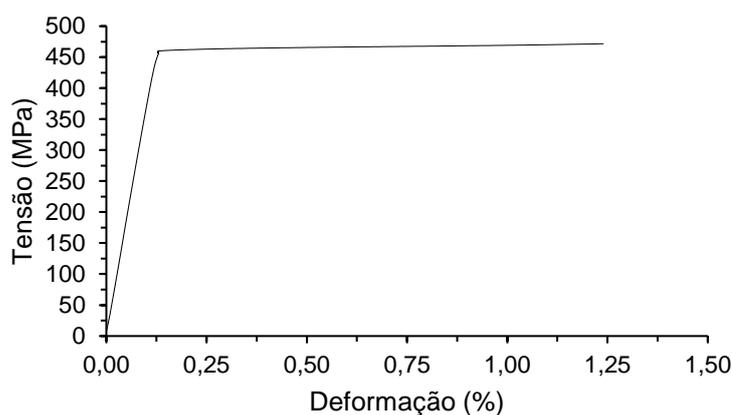


Figura 55 - Ensaio de tração das barras rosqueadas.

A Tabela 6 mostra as características do material utilizado nas barras de aço rosqueadas.

Tabela 6 - Características físicas e mecânicas das barras de aço rosqueadas.

Diâmetro nominal da barra (mm)	Deformação de escoamento ϵ_y	Deformação de ruptura ϵ_u	Tensão de escoamento f_y (MPa)	Modulo de elasticidade E (GPa)	Tensão de ruptura f_u (MPa)
12,5	0,14	1,24	460	370	472

Com base nos resultados do ensaio de tração das barras de aço rosqueadas foi possível calcular a deformação necessária nas barras rosqueadas para geração da força de reação nas chapas metálicas, que, por consequência, produziram as tensões de confinamento.

A Tabela 7 mostra as deformações necessárias e a força produzida para os corpos-de-prova de junta seca lisa e com um dente de cisalhamento e a Tabela 8 para os corpos-de-prova com 3 dentes.

Tabela 7 - Deformação necessária das barras de aço rosqueadas para produção das respectivas tensões confinantes nos corpos-de-prova de juntas secas lisas e com um dente de cisalhamento.

Tensão de confinamento (MPa)	Deformação específica necessária em cada barra (10^{-6})	Força de reação (kN)
1	114,71	7,5
2	229,41	15,0
3	344,12	22,5

Tabela 8 - Deformação necessária das barras de aço rosqueadas para produção das respectivas tensões confinantes nos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes de cisalhamento.

Tensão de confinamento (MPa)	Deformação específica necessária em cada barra (10^{-6})	Força de reação (kN)
1	191,18	12,5
2	382,35	25,0
3	573,53	37,5

4.2. Caracterização dos agregados graúdos reciclados e agregados miúdos

4.2.1. Perda de material pelo processo de britagem do resíduo para produção de agregado reciclado

O processo de britagem do resíduo para produção de agregado reciclado apresentou cerca de 30% de perda de material. A Tabela 9 reúne os valores dessas perdas.

Tabela 9 - Perda de material devido processo de britagem.

Medição	Peso resíduo (g)	Peso do agregado (g)	Perda (g)	Perda (%)
1	2089,18	1474,46	614,72	29,42
2	2186,10	1562,25	623,85	28,54
3	2001,38	1413,20	588,18	29,39

4.2.2. Composição granulométrica

A Figura 56 mostra a curva granulométrica dos agregados graúdos reciclados. Observa-se no gráfico, o limite inferior de granulometria para brita 0 (B0), limite superior para brita 1 (B1) e a curva granulométrica do agregado reciclado.

Devido ao processo de britagem, o agregado gráudo reciclado adquiriu duas faixas de granulometria distintas: brita 0 e 1, de acordo com a ABNT NBR 7211 (2009). As concentrações destas faixas foram cerca de 53% de brita 0 e 47% de brita 1.

A Tabela 10 resume o resultado do ensaio de granulometria do agregado gráudo reciclado.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de granulometria dos agregados gráudos reciclados

Abertura da malha (mm)	Massa peneira (g)	Massa peneira + retida (g)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% Passante
19,0	481,9	481,9	0	0	0	100
9,5	521,6	1407,6	886,000	52,650	52,650	47,350
4,75	445,8	1180,4	734,600	43,653	96,304	3,696
2,36	423,7	475,9	52,200	3,102	99,406	0,594
1,18	473,2	476,8	3,600	0,214	99,620	0,380
Fundo	392,8	399,2	6,400	0,380	100,000	0,000
Total			1682,8			

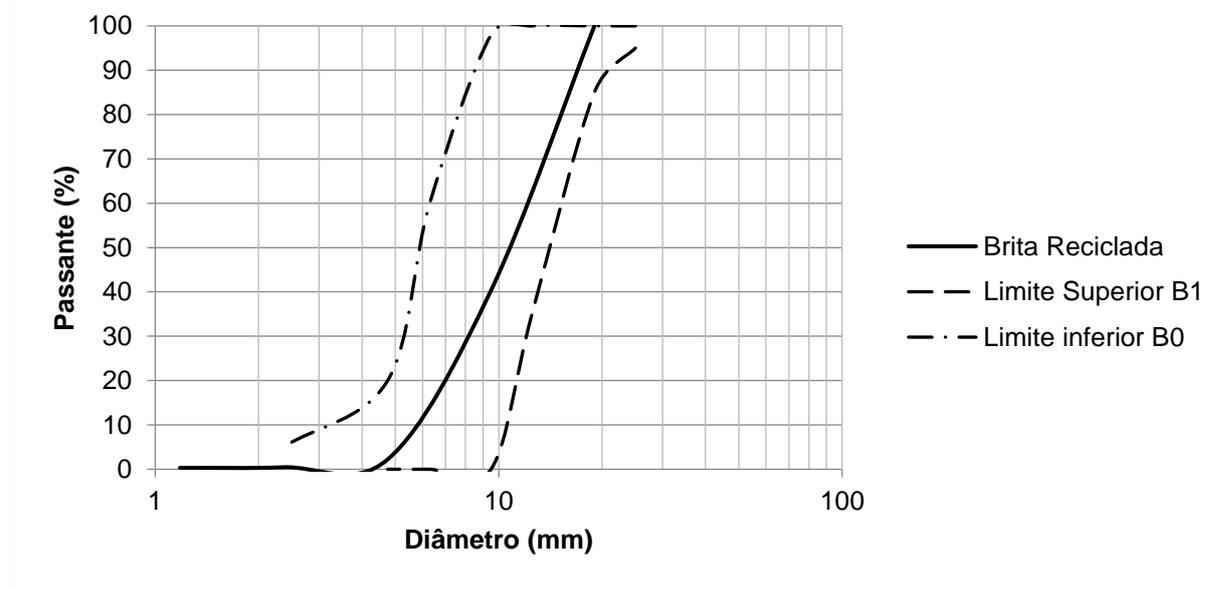


Figura 56 - Curva granulométrica dos agregados gráudos reciclados.

4.2.3. Massa específica real, unitária e aparente

A Tabela 11 mostra as massas específicas real, unitária e aparente dos agregados. Para o agregado miúdo obteve-se apenas a massa específica real.

Tabela 11 - Massa específica real, unitária e aparente dos agregados.

Agregado	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica unitária (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)
Miúdo	2,65	-	-
Graúdo reciclado	2,62	1,24	2,31
Graúdo natural	2,80	1,58	2,73

Percebe-se que devido à presença de argamassa aderida e sua elevada porosidade, o agregado graúdo reciclado apresentou valores reduzidos de massa específica.

4.2.4. Absorção de água dos agregados graúdos reciclados

Os resultados do ensaio de absorção de água dos agregados graúdos reciclados estão reunidos na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de absorção de água dos agregados graúdos reciclados.

Agregado graúdo	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Absorção (%)
Reciclado	1974,90	1871,10	5,55
Natural	2019,12	1999,65	0,97

Percebe-se que, novamente, a argamassa aderida ao agregado graúdo reciclado influenciou nas propriedades do mesmo, gerando valores elevados de absorção de água.

4.2.5. Ensaio de Abrasão Micro-Deval

Os resultados da abrasão dos agregados reciclados por meio do ensaio Micro-Deval estão reunidos na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de abrasão Micro-Deval

Peso do material antes do ensaio (g)	Peso do material pós-ensaio (g)	Perda de material (%)
2039,9	1754,90	13,97

A Figura 57 mostra o desgaste sofrido pelos agregados reciclados após o ensaio de abrasão.

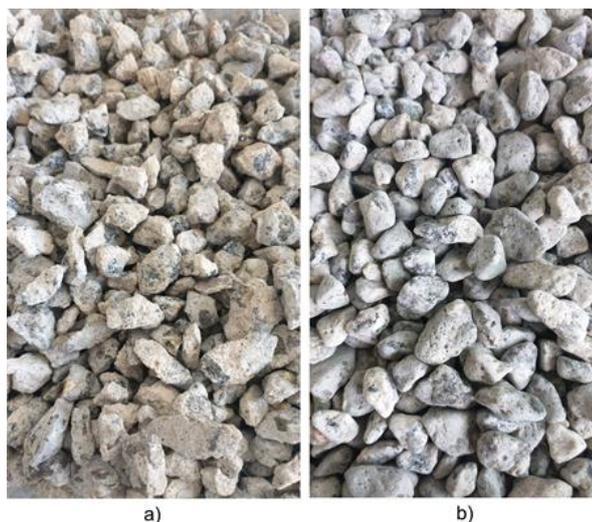


Figura 57 – Agregado reciclado: a) agregado reciclado antes do ensaio de abrasão e b) após o ensaio.

4.2.6. Quantidade de argamassa aderida ao agregado gráúdo reciclado

Os resultados do ensaio para quantificação da quantidade de argamassa aderidas estão reunidos na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de quantificação da argamassa aderida.

Peso antes do ensaio (g)	Peso após o ensaio (g)	Porcentagem de argamassa aderida (%)
300,5	180,3	40,0

4.3. Caracterização do concreto com agregados gráúdos reciclados

4.3.1. Resistência à compressão

O resultado da resistência à compressão e tração dos concretos utilizados na confecção das juntas secas apresentaram variabilidade. Foram realizadas três betonadas e optou-se por separá-los em três grupos de resistência: C35, C40 e C45, como ilustra a Tabela 15.

Tabela 15 - Resistência à compressão dos concretos utilizados na confecção das juntas secas.

	Sigla	Carga (kN)	f_c (MPa)	f_{cm} Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Dias após a concretagem
Grupo 1	C35	287,51 282,34 252,51	36,61 35,95 32,15	34,90	2,41	62
Grupo 2	C40	334,70 337,53 342,29	42,62 42,98 43,58	43,06	0,49	76
Grupo 3	C45	374,81 357,52 365,45	47,72 45,52 46,55	46,60	1,10	72

A variabilidade da resistência dos concretos se deu devido às variáveis do processo de concretagem, além da umidade e temperatura ambiente.

Segundo o teste estatístico de Duncan, todas as médias diferem entre si com um nível de 5% de significância. Para desconsiderar o efeito desta variável, a análise da resistência das juntas secas se baseou na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada pela raiz quadrada da resistência média à compressão do concreto utilizado na junta.

4.3.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados do ensaio de resistência à tração dos concretos estão ilustrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resistência à tração indireta dos concretos utilizados na confecção das juntas secas.

	Sigla	Carga (kN)	f_{ct} (MPa)	f_{ctm} Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Dias após a concretagem
Grupo 1	C35	66,99 71,82 98,20	2,13 2,29 3,13	2,51	0,53	62
Grupo 2	C40	72,86 79,97 100,07	2,32 2,55 3,19	2,68	0,45	76
Grupo 3	C45	65,67 85,77 125,17	2,09 2,76 3,98	2,93	0,96	72

4.3.3. Módulo de elasticidade

Para a obtenção do módulo de elasticidade foi utilizado o Método A – Tensão Fixa da ABNT NBR 8522 (2017). Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade dos concretos estão ilustrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Módulo de elasticidade dos concretos.

	Sigla	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	ϵ_{30}	$\sigma_{0,5\%}$ (MPa)	$\epsilon_{0,5}$	Módulo de elasticidade E_{ci} (GPa)
Grupo 1	C35	10,19	0,27	5	0,11	33,33
Grupo 2	C40	12,63	0,42	5	0,17	30,10
Grupo 3	C45	12,38	0,29	5	0,11	40,53

4.3.4. Densidade, porosidade e absorção de água do concreto

Os resultados do ensaio de absorção de água, índice de vazios e densidade do concreto estão listados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de absorção de água, índice de vazios e densidade do concreto.

Concreto	Massa seca (kg)	Massa saturada submersa (kg)	Massa saturada (kg)	Absorção de água (%)	Índice de vazios	Densidade (kg/m ³)
Reciclado	3,25	1,92	3,49	7,38	15,29	2,45
Natural	3,36	2,07	3,53	4,91	11,39	2,62

Os resultados mostraram que o concreto com agregados graúdos reciclados apresentou maiores valores de absorção de água e porosidade, comparado ao concreto natural. Além disso, a densidade foi menor. Isso ocorreu, pois, o concreto com agregados graúdos reciclados adquiriu as propriedades do agregado reciclado.

4.3.5. Microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados

Os resultados do ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados estão ilustrados nas Figura 58 a Figura 61. As Tabela 19 a Tabela 22 mostram os parâmetros de rugosidade R_a , R_p , R_v , R_z , R_c , R_t e R_q , sob diferentes aumentos.

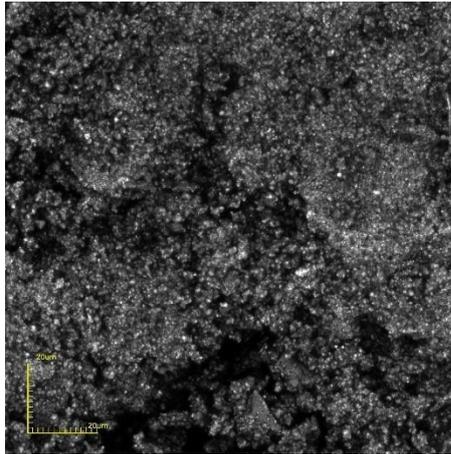


Figura 58 - Região 1 aumentada 100x no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.

Tabela 19 - Parâmetro Ra da região 1.

Aumento	R _a (μm)	R _p (μm)	R _v (μm)	R _z (μm)	R _c (μm)	R _t (μm)	R _q (μm)
5x	3,19	9,04	12,42	21,46	9,59	30,86	4,20
20x	2,97	8,11	11,47	19,58	9,84	19,58	3,82
100x	1,71	4,32	6,79	11,11	5,14	12,12	2,24

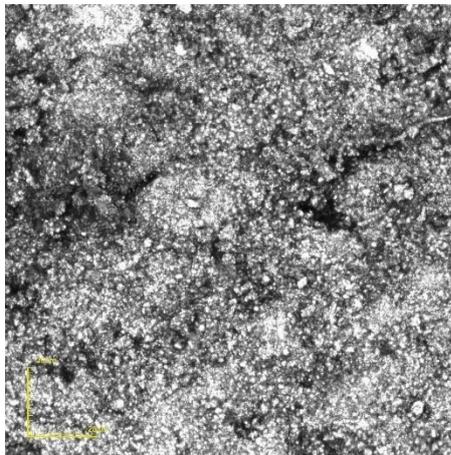


Figura 59 - Região 2 aumentada 100x no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.

Tabela 20 - Parâmetro Ra da região 2.

Aumento	R _a (μm)	R _p (μm)	R _v (μm)	R _z (μm)	R _c (μm)	R _t (μm)	R _q (μm)
5x	2,59	9,76	8,65	18,41	8,44	25,91	3,37
20x	2,20	7,12	6,87	13,99	7,18	13,99	2,80
100x	1,26	5,30	3,35	8,65	3,95	9,29	1,66

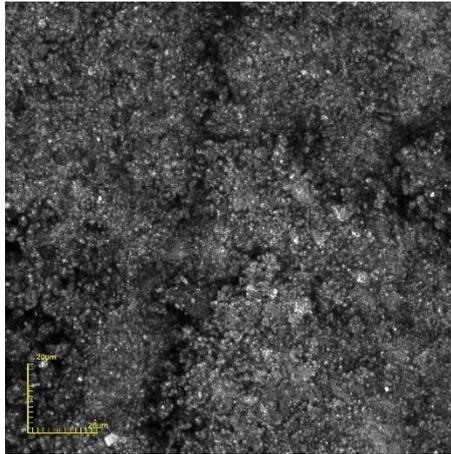


Figura 60 - Região 3 aumentada 100x no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.

Tabela 21 - Parâmetro Ra da região 3.

Aumento	R _a (μm)	R _p (μm)	R _v (μm)	R _z (μm)	R _c (μm)	R _t (μm)	R _q (μm)
5x	4,77	13,32	16,64	29,97	13,90	46,67	6,18
20x	3,30	8,81	9,61	18,42	10,62	18,42	4,09
100x	1,23	3,74	3,63	7,37	3,58	8,16	1,49

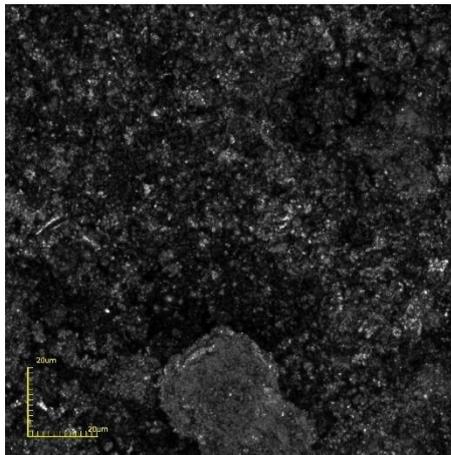


Figura 61 - Região 4 aumentada 100x no ensaio de microscopia da superfície do concreto com agregados graúdos reciclados.

Tabela 22 - Parâmetro Ra da região 4.

Aumento	R _a (μm)	R _p (μm)	R _v (μm)	R _z (μm)	R _c (μm)	R _t (μm)	R _q (μm)
5x	5,61	17,07	19,96	37,03	19,73	61,45	7,25
20x	5,98	14,76	17,55	32,32	17,99	32,32	7,26
100x	1,41	3,75	4,29	8,03	5,06	8,98	1,75

Os resultados experimentais mostraram que as diferentes regiões tiveram parâmetro de rugosidade parecidos.

4.4. Ruptura das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados

4.4.1. Juntas secas lisas

Os resultados da carga máxima das juntas secas lisas estão reunidos na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados dos ensaios de ruptura das juntas secas lisas.

Grupos	f_{cm} (MPa)	Corpo-de-prova	Carga máxima V_u (kN)	τ_u (MPa)	$\tau_u / \sqrt{f_{cm}}$ (MPa)
Grupo 1	34,90	CPR1-L-1,0	16,94	0,56	0,09
		CPR1-L-2,0	30,34	1,01	0,15
		CPR1-L-3,0	48,18	1,61	0,24
Grupo 2	43,06	CPR2-L-1,0	18,47	0,62	0,09
		CPR2-L-2,0	32,50	1,08	0,16
		CPR2-L-3,0	44,18	1,47	0,22
Grupo 3	46,59	CPR3-L-1,0	15,54	0,52	0,09
		CPR3-L-2,0	33,20	1,11	0,19
		CPR3-L-3,0	43,57	1,45	0,25

A tensão de cisalhamento máxima foi obtida dividindo a carga de ruptura pela área do plano de cisalhamento da junta seca lisa (30.000 mm²).

Os resultados mostraram um aumento da carga de ruptura conforme aumentou a tensão de confinamento. Os corpos-de-prova do grupo 1 ($f_{cm} = 34,90$ MPa), apresentaram um aumento de 79,10% da carga de ruptura quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa e 184,42% quando aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Nos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_{cm} = 43,06$ MPa) o aumento foi de 75,96% quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa e 139,20% quando aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Nos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_{cm} = 46,59$ MPa) o aumento foi de 113,64% quando a tensão confinante aumentou de 1 MPa para 2 MPa e 180,37% quando aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Esses resultados estão resumidos na Tabela 24.

Tabela 24 - Percentual de aumento da carga de ruptura devido ao aumento da tensão de confinamento nos corpos-de-prova de juntas secas lisas.

Aumento da tensão de confinamento de: (MPa)	Grupo 1 (%)	Grupo 2 (%)	Grupo 3 (%)
1 → 2	79,10	75,96	113,64
1 → 3	184,42	139,20	180,37
2 → 3	58,80	35,94	31,23

4.4.1.1. Influência da tensão de confinamento

As Figuras 62, 63 e 64 mostram as curvas de carga *versus* deslizamento dos ensaios de ruptura dos corpos-de-prova do tipo *push-off* dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente, de juntas secas lisas, para as tensões de confinamento de 1, 2 e 3 MPa.

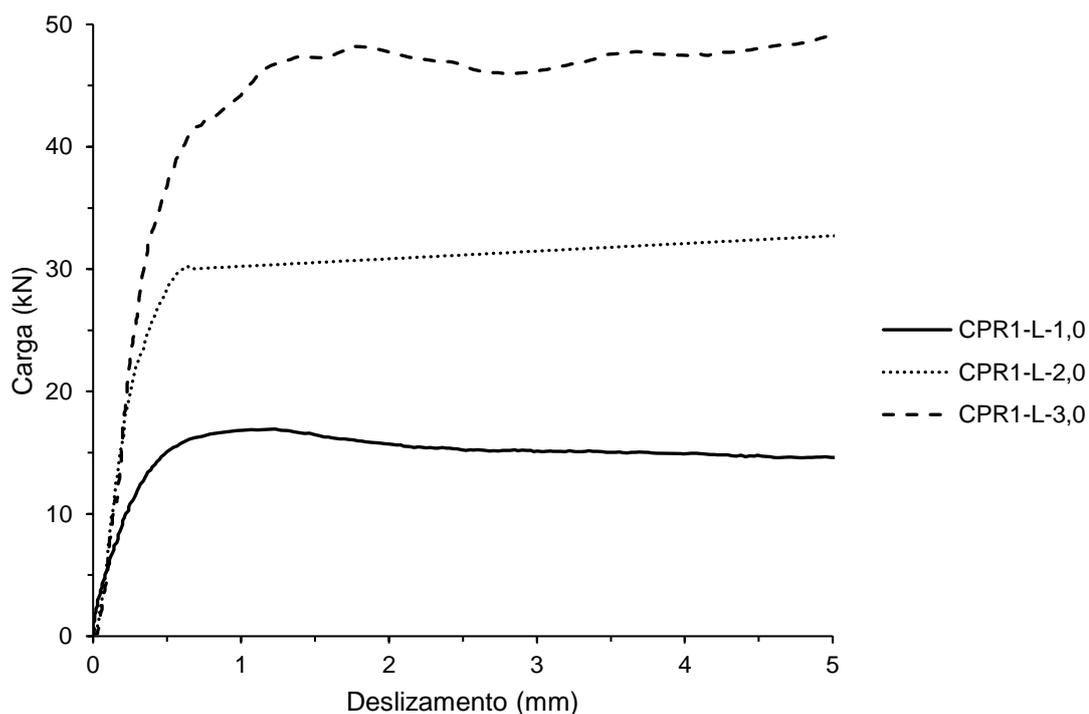


Figura 62 - Curva carga *versus* deslizamento vertical das juntas secas lisas do grupo 1.

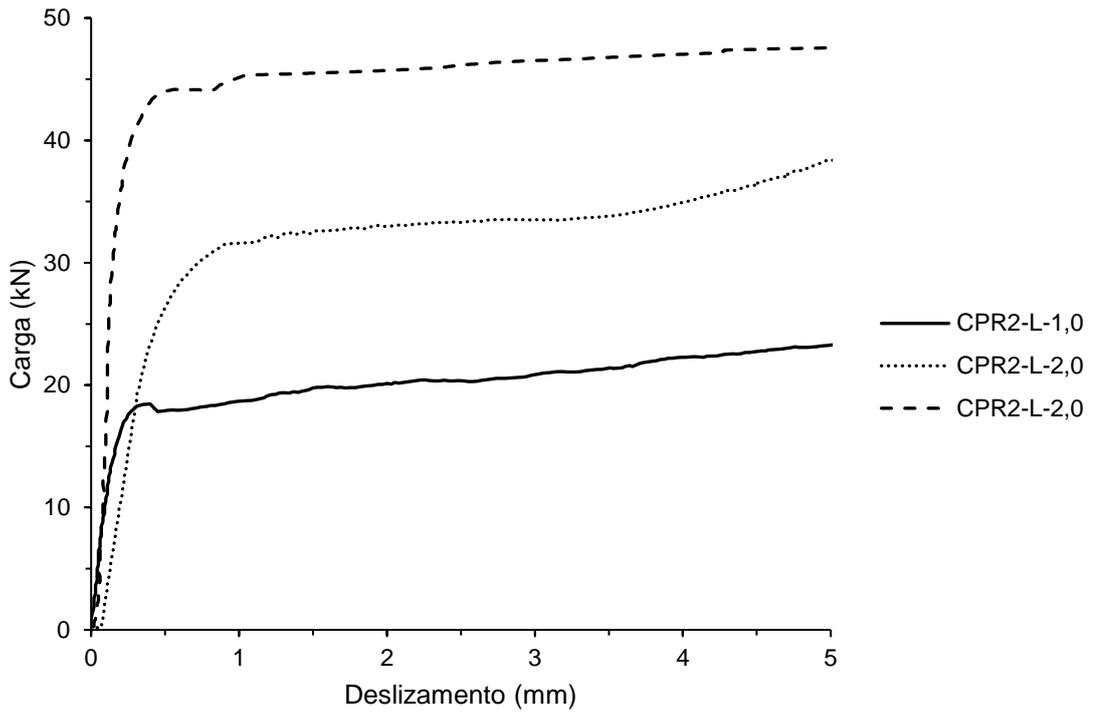


Figura 63 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas lisas do grupo 2.

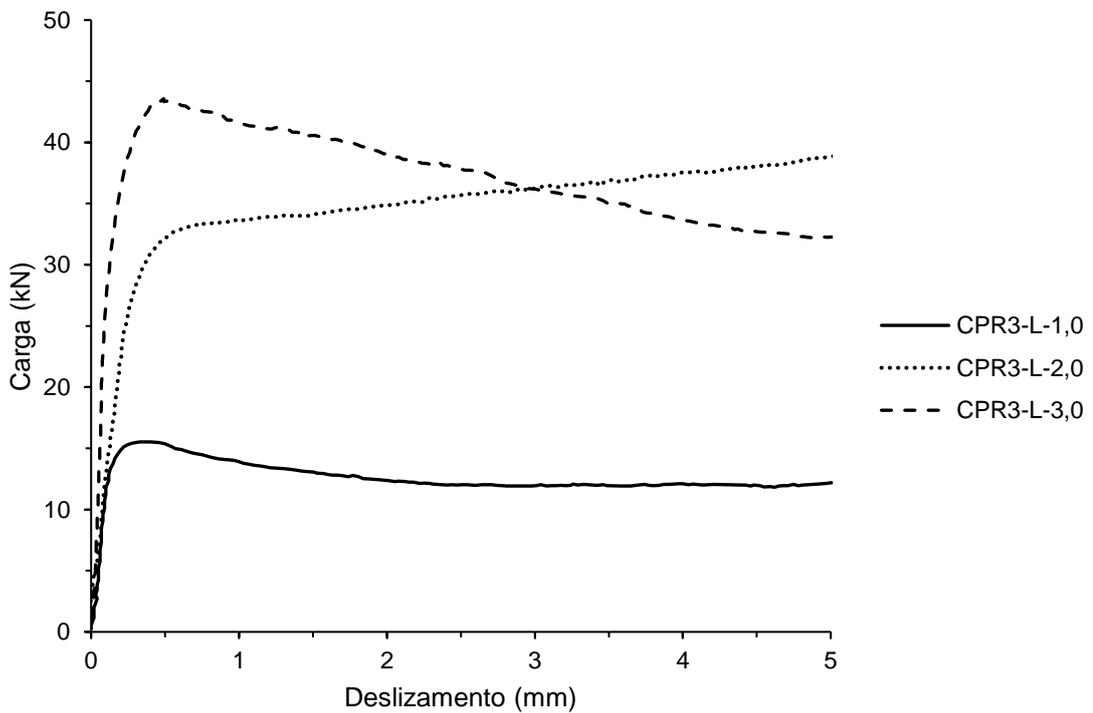


Figura 64 - Curva carga versus deslizamento vertical das juntas secas lisas do grupo 3.

Na maioria dos corpos-de-prova observou-se um padrão de comportamento similar. Nota-se no primeiro estágio de carregamento um aumento da carga com pequenos valores de deslizamento. Antes de atingir a carga máxima a curva tendeu a

apresentar uma taxa de deslizamento maior (provocada pela micro-fissuração da superfície). Após atingir a carga máxima, as curvas apresentaram uma tendência de se manterem constantes para a mesma carga conforme aumentou o deslizamento

4.4.1.2. Análise da tensão de cisalhamento normalizada

Devido à variação da resistência à compressão do concreto com agregados graúdos reciclados em cada concretagem, se fez necessária a normalização da tensão de cisalhamento em relação à raiz quadrada da resistência à compressão do concreto, assim, eliminou-se a influência da variação da resistência do concreto nos resultados experimentais. Esse artifício foi de importância maior para as juntas secas com dentes de cisalhamento.

As Figuras 65, 66 e 67 mostram as curvas de tensão de cisalhamento normalizada (τ_n) versus deslizamento dos ensaios de ruptura dos corpos-de-prova do tipo *push-off* das juntas secas lisas para as tensões de confinamento de 1, 2 e 3 MPa, respectivamente.

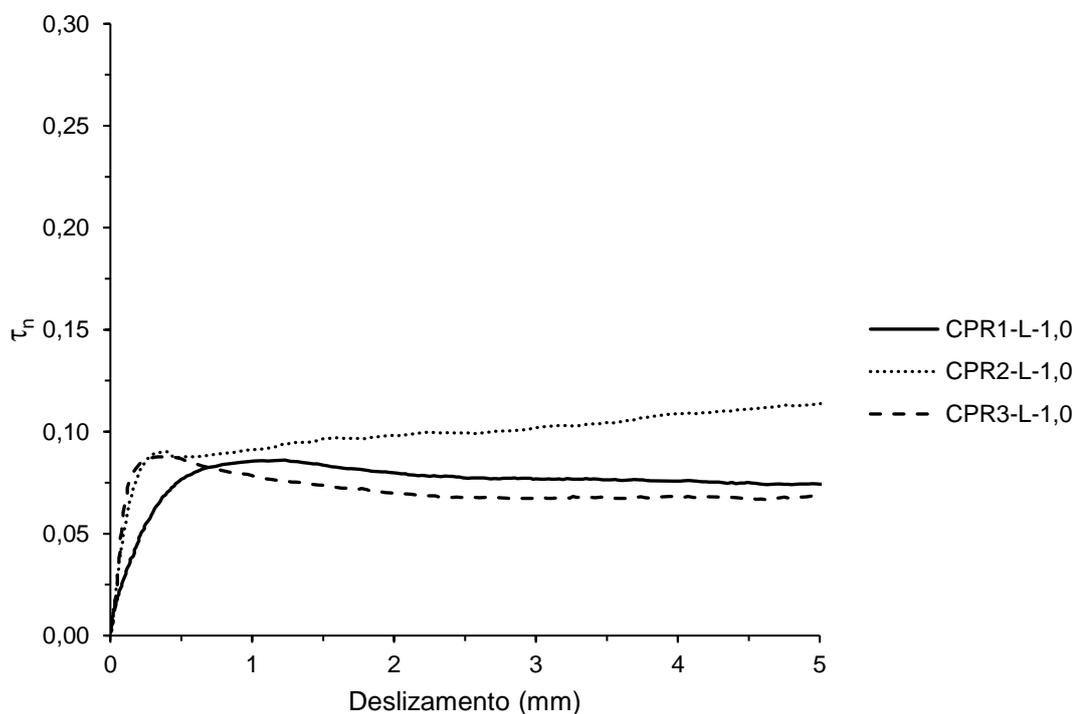


Figura 65 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas lisas para a tensão de confinamento de 1 MPa.

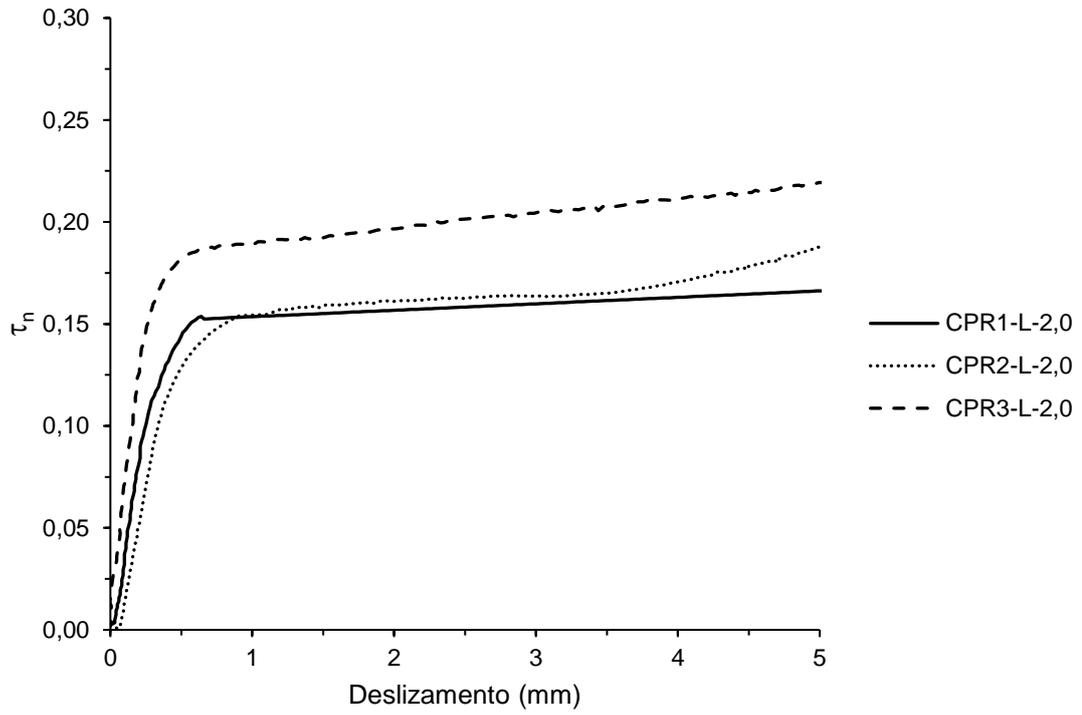


Figura 66 - Curva tensão de cisalhamento normalizada *versus* deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas lisas para a tensão de confinamento de 2 MPa.

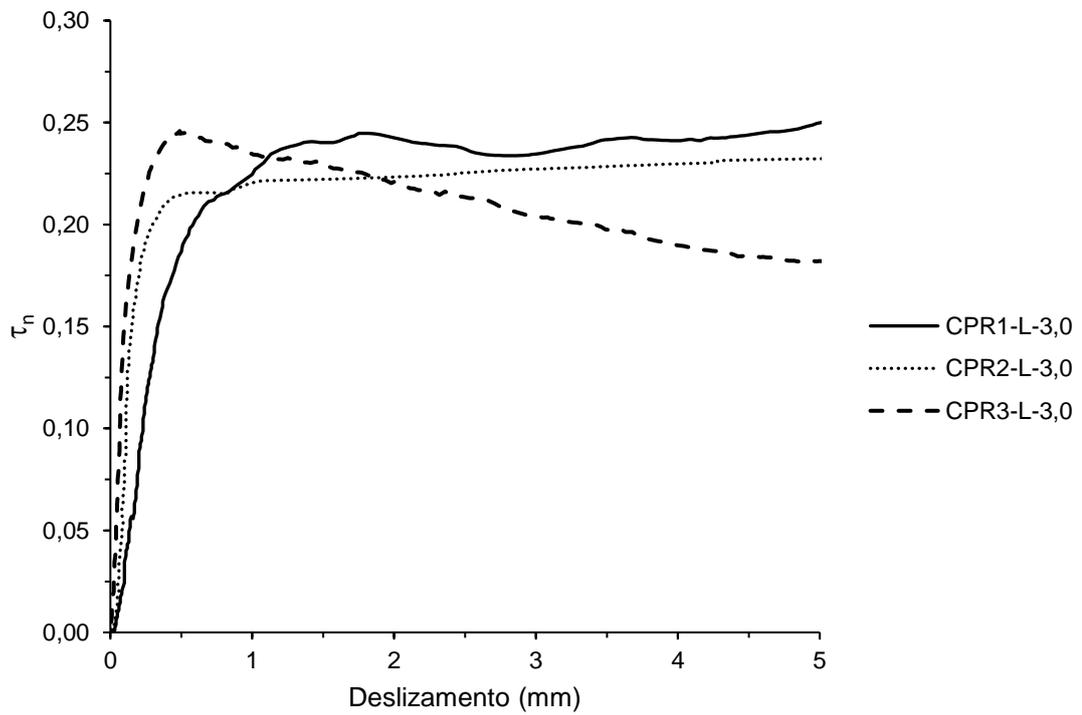


Figura 67 - Curva tensão de cisalhamento normalizada *versus* deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas lisas para a tensão de confinamento de 3 MPa.

Nota-se que para a mesma tensão de confinamento, a tensão de cisalhamento normalizada apresenta valores próximos nos diferentes grupos de resistência do concreto.

A Figura 68 mostra os valores das tensões de cisalhamento normalizada máximas (τ_{un}) versus tensão de confinamento das juntas secas lisas, com a identificação do tipo de corpo-de-prova.

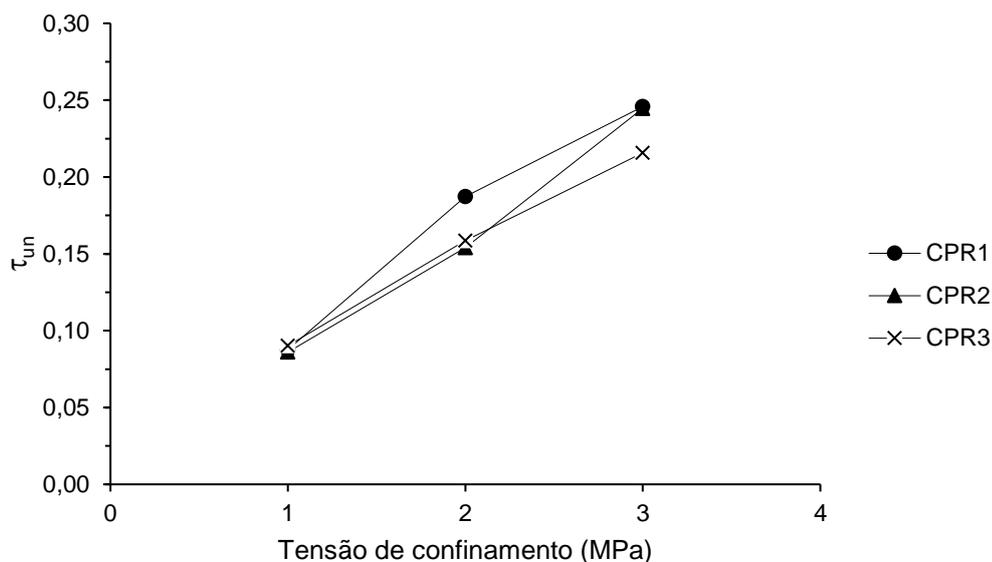


Figura 68 - Tensão de cisalhamento normalizada máxima dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas lisas.

Observa-se que os resultados apresentaram pouca diferença entre as tensões de cisalhamento normalizada máxima para uma mesma tensão de confinamento.

A Tabela 25 mostra alguns parâmetros estatísticos das médias das tensões de cisalhamento normalizadas máximas dos corpos-de-prova de juntas secas lisas ($\tau_{un,m}$) e a Figura 69 mostra a influência das tensões de confinamento no aumento das médias das tensões de cisalhamento normalizadas máximas.

Tabela 25 - Parâmetros estatísticos da tensão de cisalhamento normalizada das juntas secas lisas.

Tensão de confinamento	$\tau_{un,m}$	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
1 MPa	0,09	0,002	2,37
2 MPa	0,17	0,018	10,79
3 MPa	0,24	0,017	7,25

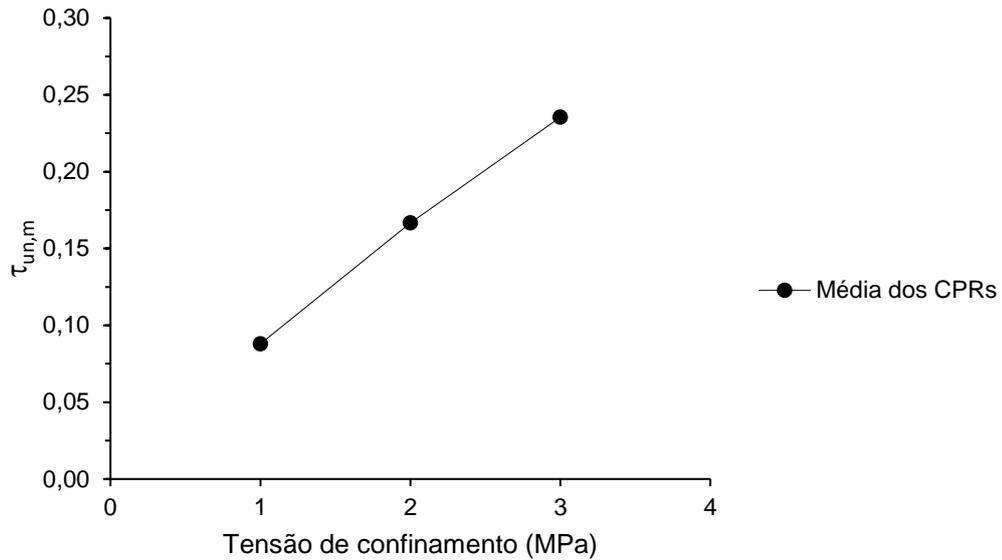


Figura 69 - Média dos valores da tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas lisas.

Os resultados mostraram que a tensão de confinamento desempenhou um papel importante no aumento da tensão de cisalhamento normalizada máximas das juntas secas lisas. Esse aumento foi cerca de 89,50% quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa, cerca de 167,22% quando aumento de 1 MPa para 3 MPa e cerca de 41,22% quando aumentou de 2 MPa para 3 MPa.

A Figura 70 mostra a curva média da tensão de cisalhamento normalizada ($\tau_{n,m}$) versus deslizamento das juntas secas lisas, para as tensões de confinamento estudadas.

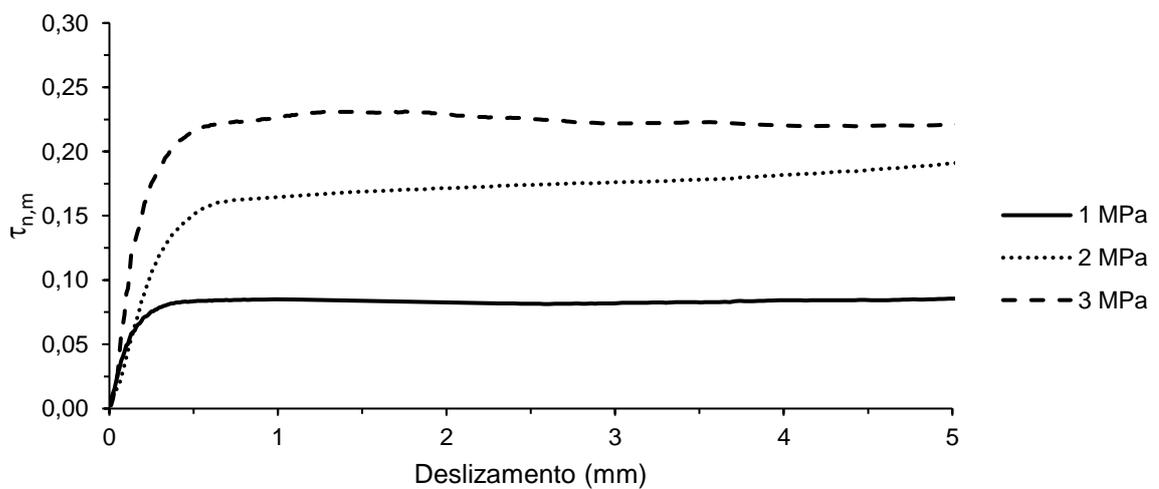


Figura 70 – Curva média da tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento das juntas secas lisas, para as tensões de confinamento estudadas.

Os resultados mostraram um aumento da resistência das juntas secas lisas conforme o aumento da tensão de confinamento.

4.4.1.3. Coeficiente de fricção

De acordo com os resultados experimentais, foi possível determinar o coeficiente de fricção (μ) das juntas secas lisas por meio da Equação 4, esses resultados estão ilustrados na Tabela 26.

Tabela 26 - Coeficiente de fricção das juntas secas lisas.

Tensão confinante	Coeficiente de fricção μ
1 MPa	0,566
2 MPa	0,534
3 MPa	0,503

4.4.2. Juntas secas com um dente

Os resultados dos ensaios de ruptura das juntas secas com um dente de cisalhamento estão reunidos na Tabela 27.

Tabela 27 - Resultados dos ensaios de ruptura das juntas secas com um dente de cisalhamento.

Grupos	f_{cm} (MPa)	Corpo-de-prova	Carga máxima V_u (kN)	τ_u (MPa)	$\tau_u / \sqrt{f_{cm}}$ (MPa)
Grupo 1	34,90	CPR3-1-1,0	80,15	2,67	0,45
		CPR3-1-2,0	*	*	*
		CPR3-1-3,0	110,01	3,67	0,62
Grupo 2	43,06	CPR1-1-1,0	81,95	2,73	0,42
		CPR1-1-2,0	101,05	3,37	0,51
		CPR1-1-3,0	117,36	3,91	0,60
Grupo 3	46,59	CPR2-1-1,0	96,45	3,22	0,47
		CPR2-1-2,0	108,73	3,62	0,53
		CPR2-1-3,0	117,95	3,93	0,58

* Erro no ensaio do corpo-de-prova.

A tensão de cisalhamento máxima foi obtida dividindo a carga de ruptura pela área do plano de cisalhamento da junta seca com um dente (30.000 mm²).

Os resultados mostraram um aumento da carga de ruptura conforme aumentou a tensão de confinamento. Esse aumento foi mais acentuado nos corpos-de-prova do

grupo 2 ($f_{cm} = 43,06$ MPa), com 23% de aumento quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa e 43% quando aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Nos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_{cm} = 46,59$ MPa) o aumento foi de 12% quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa e 22% quando aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Nos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_{cm} = 34,90$ MPa) o aumento foi de 37% quando a tensão confinante aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Esses resultados estão resumidos na Tabela 28.

Tabela 28 - Percentual de aumento da carga de ruptura devido ao aumento da tensão de confinamento nos corpos-de-prova de juntas secas com um dente de cisalhamento.

Aumento da tensão de confinamento de: (MPa)	Grupo 1 (%)	Grupo 2 (%)	Grupo 3 (%)
1 → 2	*	23,32	12,71
1 → 3	37,15	43,05	22,28
2 → 3	*	16,00	8,49

* Análise inválida devido ao erro no ensaio do corpo-de-prova (CPR3-1-2,0).

4.4.2.1. Influência da tensão de confinamento

As Figuras 71, 72 e 73 mostram as curvas de carga *versus* deslizamento dos ensaios de ruptura dos corpos-de-prova do tipo *push-off* dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente, de juntas secas com um dente de cisalhamento, para as tensões de confinamento de 1, 2 e 3 MPa.

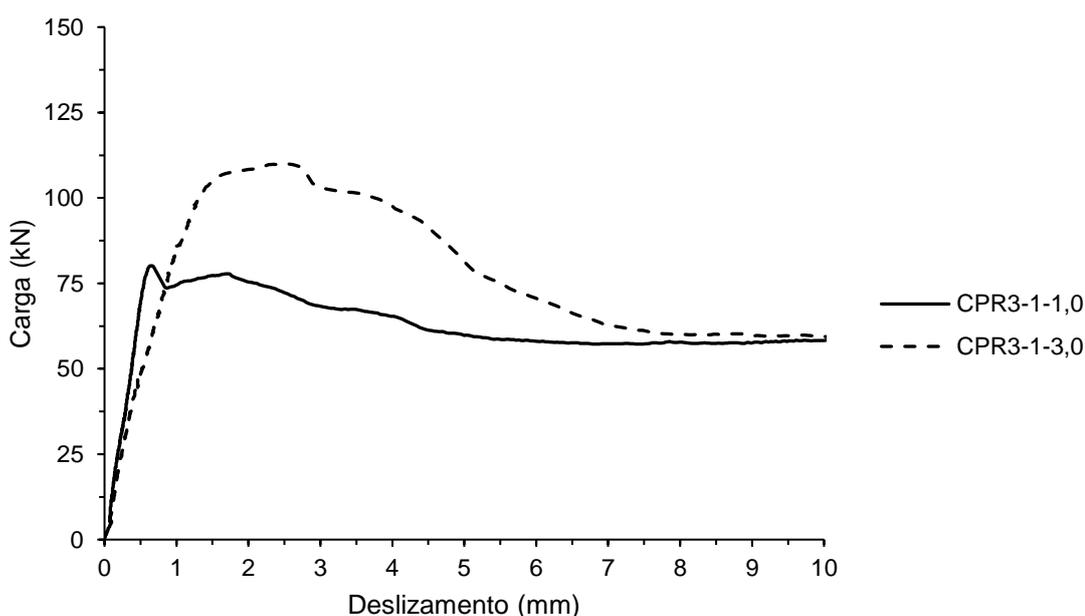


Figura 71 – Curva carga *versus* deslizamento vertical das juntas secas com um dente de cisalhamento do grupo 1.

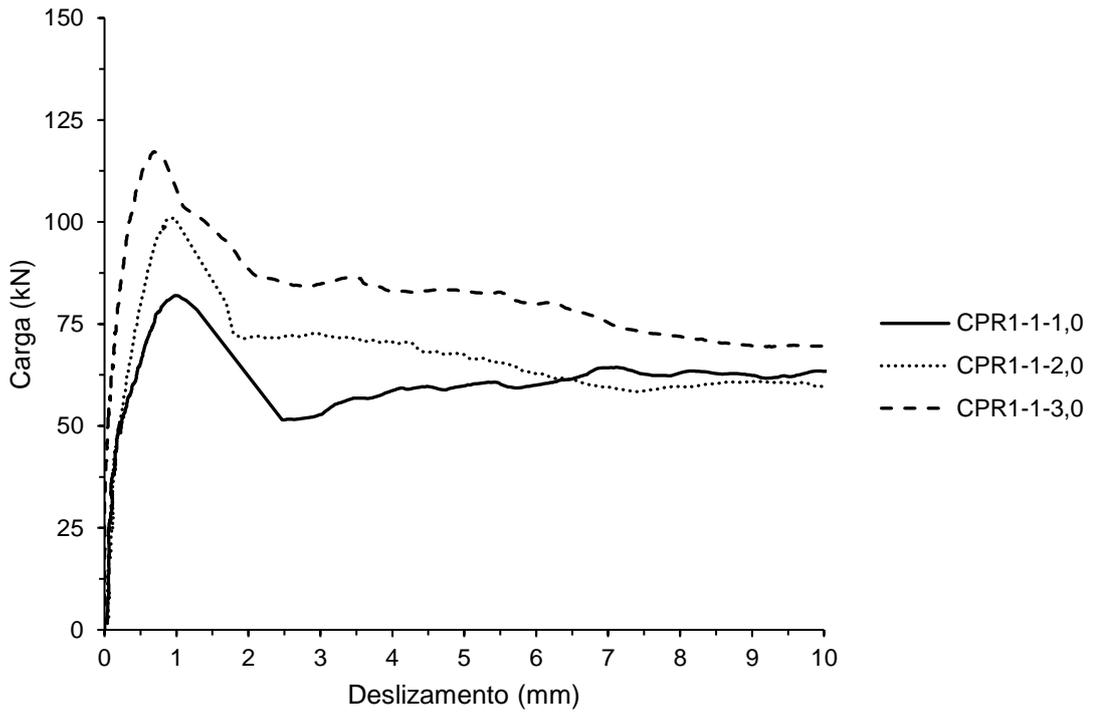


Figura 72 - Curva carga *versus* deslizamento vertical das juntas secas com um dente de cisalhamento do grupo 2.

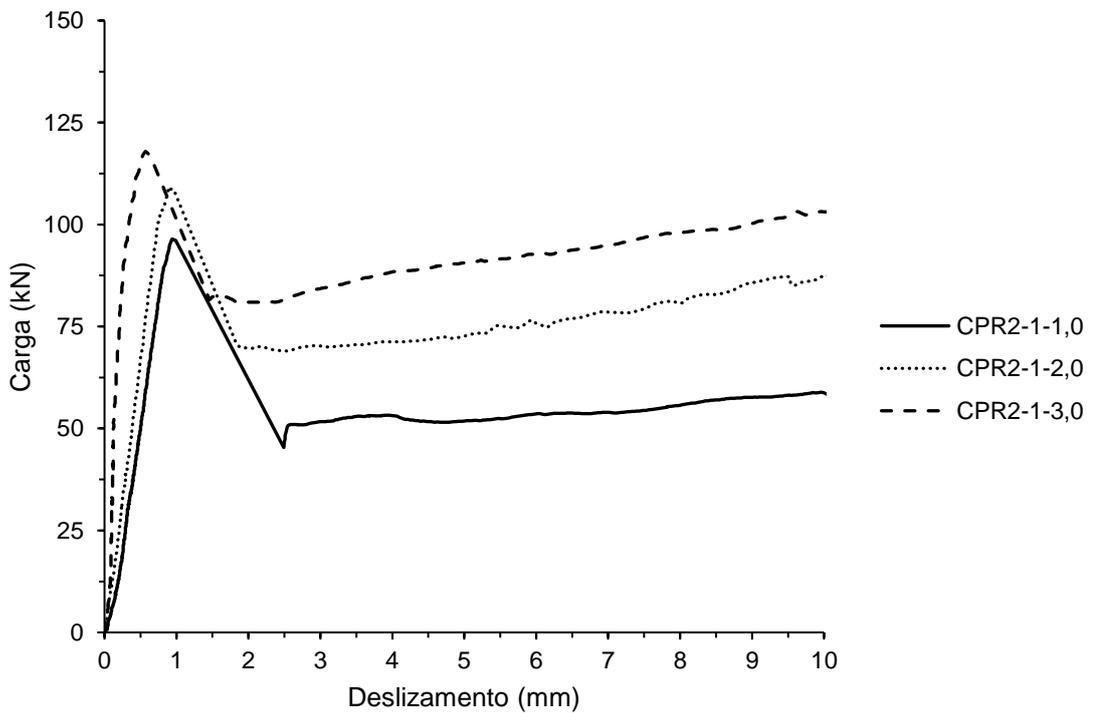


Figura 73 - Curva carga *versus* deslizamento vertical das juntas secas com um dente de cisalhamento do grupo 3.

Em todos os corpos-de-prova observou-se um padrão de comportamento similar. Nota-se no primeiro estágio de carregamento um aumento da carga com

pequenos valores de deslizamento. Antes de atingir a carga máxima ou ruptura vertical do dente, a curva tendeu a apresentar uma taxa de deslizamento maior (provocada pela micro-fissuração interna do concreto e a conseqüente não linearidade física). Após atingida a carga máxima, as curvas apresentaram uma diminuição da carga, seguido de uma recuperação e aumento da carga com o aumento do deslizamento (isto aconteceu na maioria dos corpos-de-prova). Isto aconteceu porque no decorrer do ensaio o sistema fabricado para fornecer confinamento tendeu a aumentar as deformações das barras e conseqüentemente aumentar a tensão de confinamento.

4.4.2.2. Resistência residual

A partir da ruptura vertical do dente (valor máximo de carga), a junta ainda suportou uma certa quantidade de carga, chamada de resistência residual. Essa resistência depende do tipo de junta e da magnitude da tensão de confinamento aplicada, uma vez que, se não houvesse aplicação de confinamento, a junta se desmontaria em ambas as partes.

Nesse estágio, o dente de cisalhamento se encontra rompido no plano de cisalhamento, e uma fissura divide o corpo-de-prova, como ilustra a Figura 74.



Figura 74 – Corpo-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento rompido.

Sendo assim, conforme o deslizamento aumenta, surge um mecanismo de fricção entre ambas as superfícies de concreto, contribuindo para a resistência da junta, como prevê a teoria do atrito-cisalhamento.

A Tabela 29 mostra a relação entre a carga residual e a carga máxima (V_r/V_u), onde (V_r) é definida como a média entre a carga pós-pico ($V_{r,pós}$) e a carga residual para o deslizamento de 10 mm ($V_{r,10mm}$).

Tabela 29 - Relação entre a resistência residual e de ruptura das juntas secas com um dente de cisalhamento.

Corpo-de-prova	V_u	$V_{r,pós}$	$V_{r,10mm}$	V_r	V_r/V_u
CPR1-1-1,0	81,95	51,49	63,34	57,42	0,70
CPR1-1-2,0	101,05	71,63	59,60	65,62	0,65
CPR1-1-3,0	117,36	87,32	70,49	78,91	0,67
CPR2-1-1,0	96,45	50,43	57,18	53,81	0,56
CPR2-1-2,0	108,73	70,55	82,84	76,70	0,71
CPR2-1-3,0	117,95	81,57	101,78	91,68	0,78
CPR3-1-1,0	80,15	57,51	57,63	57,57	0,72
CPR3-1-3,0	110,01	60,54	60,09	60,32	0,55

Os resultados mostraram que as cargas residuais das juntas secas com um dente de cisalhamento estão na faixa de 60% a 80% da resistência de ruptura da junta.

4.4.2.3. Análise da tensão de cisalhamento normalizada

Devido à variação da resistência à compressão do concreto com agregados graúdos reciclados em cada concretagem, se fez necessária a normalização da tensão de cisalhamento em relação à raiz quadrada da resistência à compressão do concreto, assim, eliminou-se a influência da variação da resistência do concreto nos resultados experimentais.

As Figuras 75, 76 e 77 mostram as curvas de tensão de cisalhamento normalizada (τ_n) versus deslizamento dos ensaios de ruptura dos corpos-de-prova do tipo *push-off* das juntas secas com um dente de cisalhamento para as tensões de confinamento de 1, 2 e 3 MPa, respectivamente.

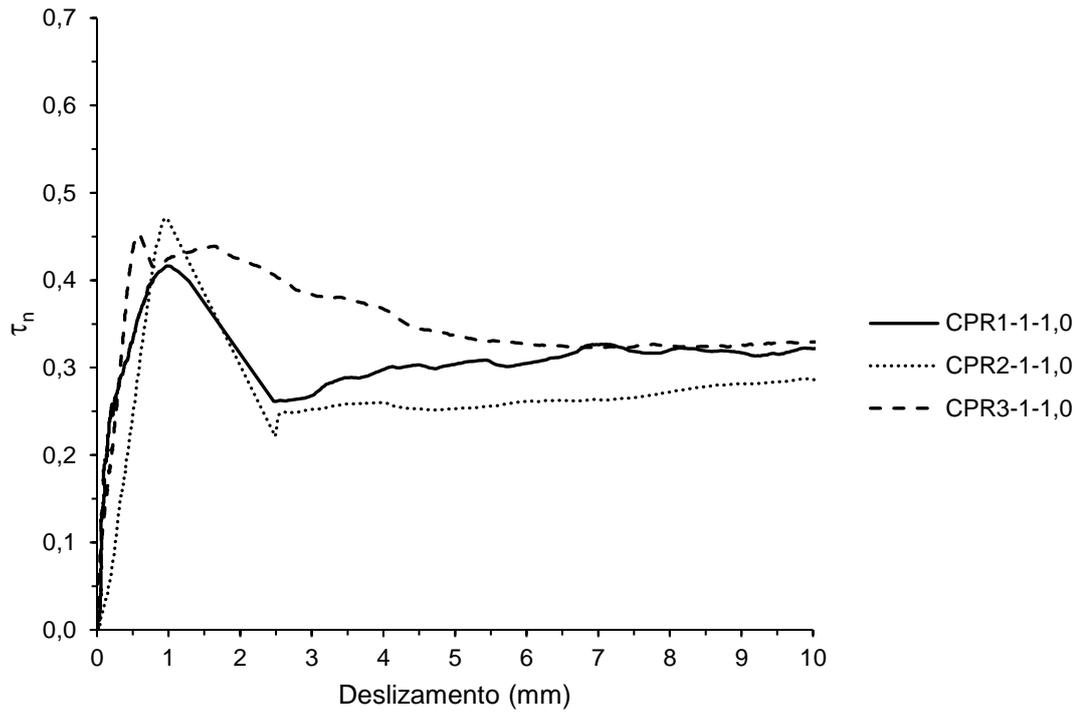


Figura 75 - Curva tensão de cisalhamento normalizada *versus* deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com um dente para a tensão de confinamento de 1 MPa.

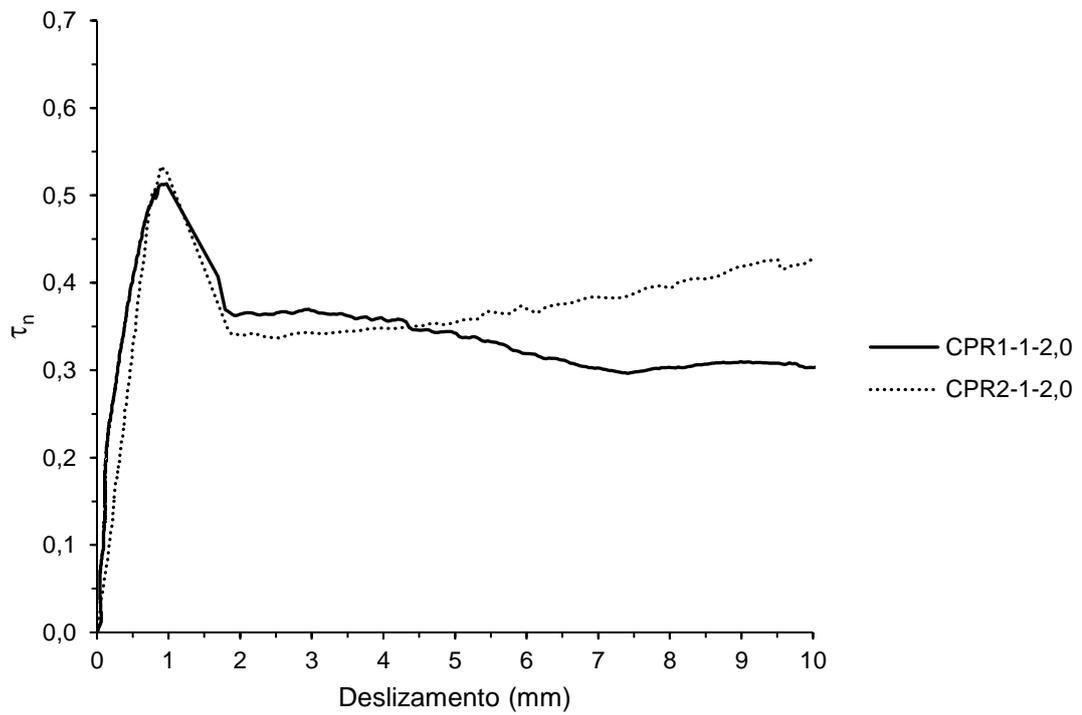


Figura 76 - Curva tensão de cisalhamento normalizada *versus* deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com um dente para a tensão de confinamento de 2 MPa.

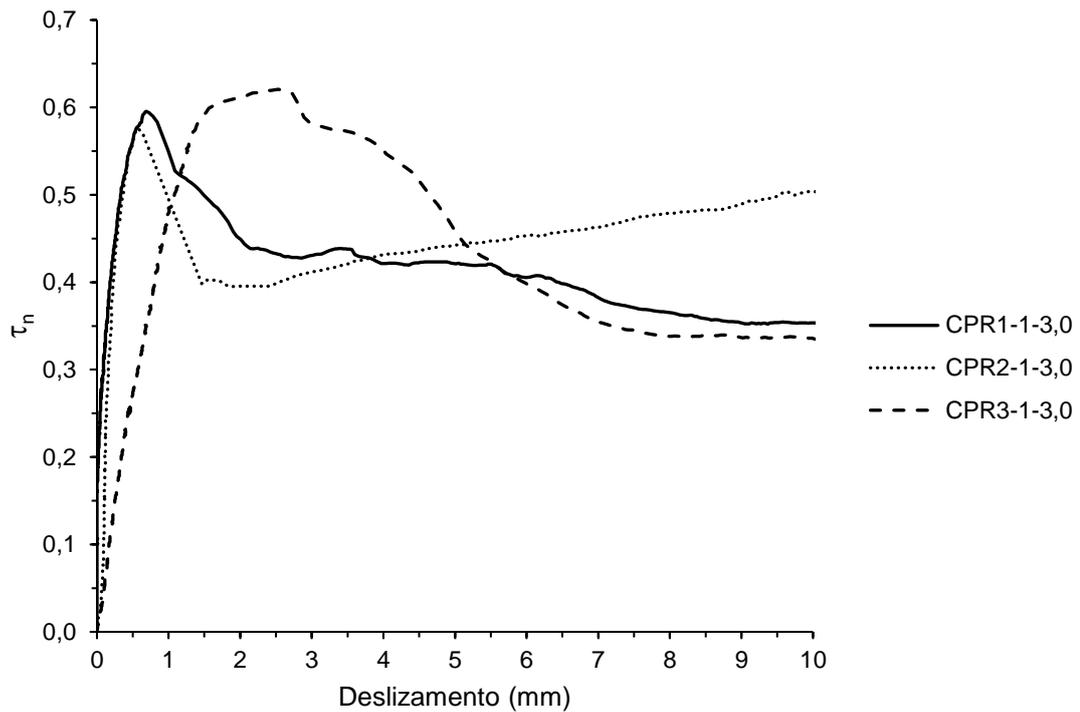


Figura 77 - Curva tensão de cisalhamento normalizada *versus* deslocamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com um dente para a tensão de confinamento de 3 MPa.

Os resultados mostraram que o aumento da tensão de confinamento influenciou no aumento da tensão de cisalhamento normalizada das juntas secas com um dente de cisalhamento. Além disso, notou-se uma tendência da ruptura das juntas ocorrerem em valores de deslocamento menores conforme o aumento da tensão de confinamento, como mostra a Tabela 30.

Tabela 30 - Deslizamentos na ruptura dos corpos-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento.

Corpo-de-prova	Deslizamento de ruptura (mm)
CPR1-1-1,0	1,01
CPR1-1-2,0	0,97
CPR1-1-3,0	0,69
CPR2-1-1,0	0,99
CPR2-1-2,0	0,96
CPR2-1-3,0	0,64
CPR3-1-1,0	0,66
CPR3-1-3,0	2,53

O corpo-de-prova do grupo 1 CPR3-1-3,0 apresentou elevado deslocamento na ruptura, caracterizando uma ruptura dúctil, divergindo do padrão encontrado.

A Figura 78 mostra os valores das tensões de cisalhamento normalizada máximas (τ_{un}) versus tensão de confinamento das juntas secas com um dente de cisalhamento, com a identificação do tipo de corpo-de-prova.

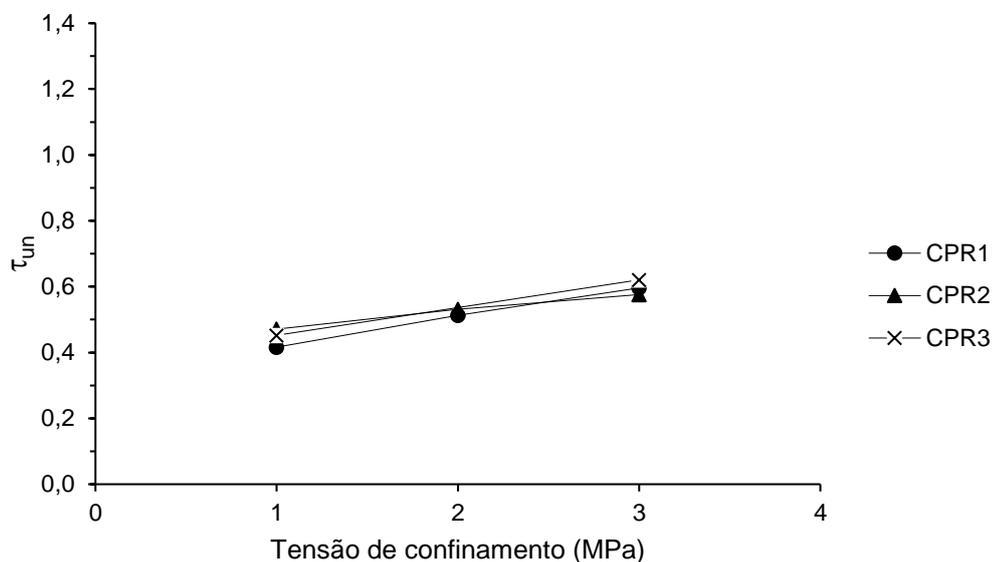


Figura 78 - Tensão de cisalhamento normalizada máxima dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas com um dente de cisalhamento.

Observa-se que os resultados apresentaram pouca diferença entre as tensões de cisalhamento normalizada máxima para uma mesma tensão de confinamento.

A Tabela 31 mostra alguns parâmetros estatísticos das médias das tensões de cisalhamento normalizadas máximas dos corpos-de-prova de juntas secas com um dente de cisalhamento ($\tau_{un,m}$) e a Figura 79 mostra a influência das tensões de confinamento no aumento das médias das tensões de cisalhamento normalizadas máximas.

Tabela 31 – Parâmetros estatísticos da tensão de cisalhamento normalizada das juntas secas com um dente de cisalhamento.

Tensão de confinamento	$\tau_{un,m}$	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
1 MPa	0,45	0,028	6,22
2 MPa	0,52	0,012	2,31
3 MPa	0,60	0,014	2,33

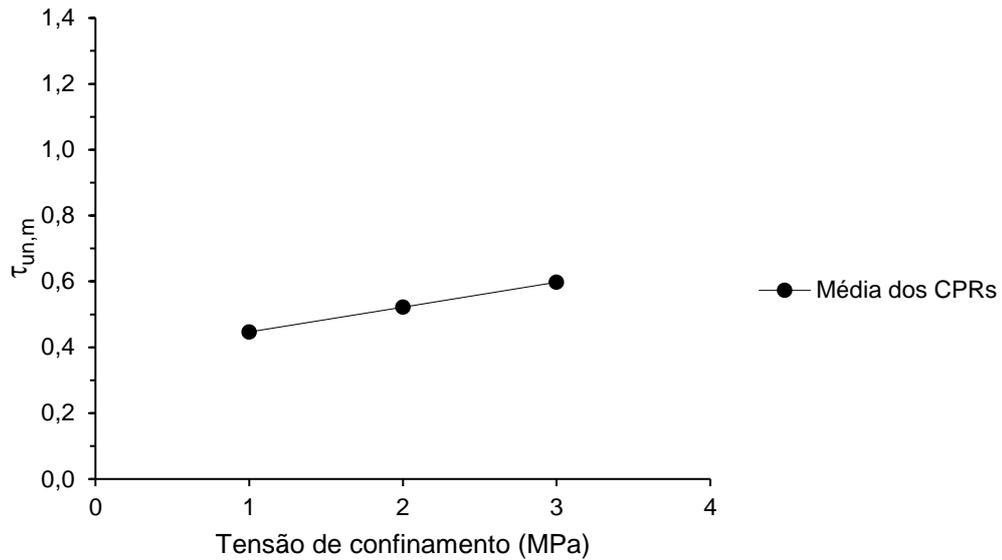


Figura 79 - Média dos valores da tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com um dente de cisalhamento.

Os resultados mostraram que a tensão de confinamento desempenhou um papel importante no aumento da tensão de cisalhamento normalizada máximas das juntas secas com um dente de cisalhamento. Esse aumento foi cerca de 15,56% quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa, cerca de 33,33% quando aumento de 1 MPa para 3 MPa e cerca de 15,38% quando aumentou de 2 MPa para 3 MPa.

A Figura 80 mostra a curva média da tensão de cisalhamento normalizada ($\tau_{n,m}$) versus deslizamento das juntas secas com um dente de cisalhamento, para as tensões de confinamento estudadas.

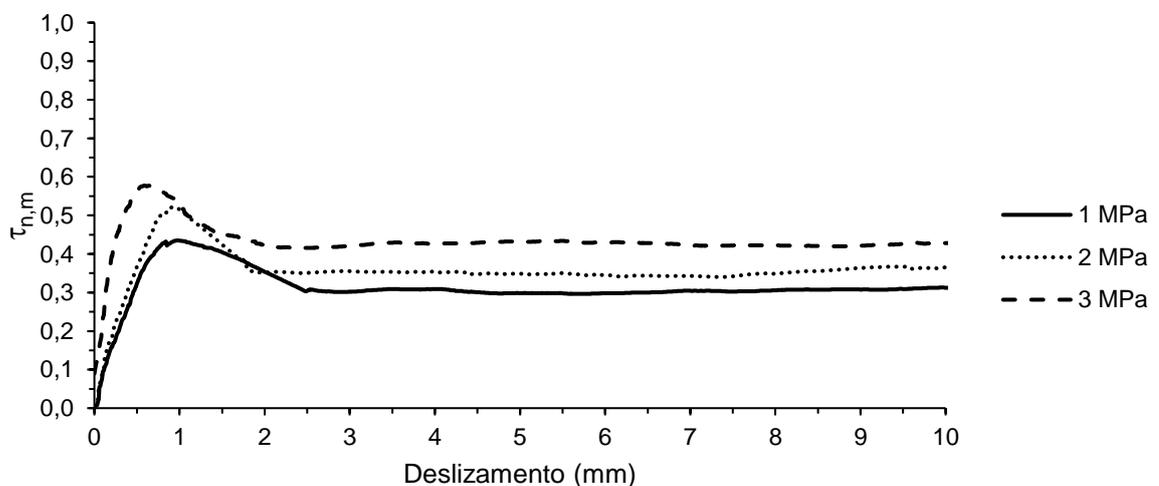


Figura 80 – Curva média da tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento das juntas secas com um dente de cisalhamento, para as tensões de confinamento estudadas.

Os resultados mostraram um aumento da resistência das juntas secas com um dente de cisalhamento conforme o aumento da tensão de confinamento. Além disso, notou-se um aumento da rigidez da junta conforme o aumento do confinamento, ocasionando a ruptura em valores de deslizamento menores. O corpo-de-prova CPR3-1-3,0 foi desconsiderado na obtenção da curva média de 3 MPa devido sua discrepância perante os outros resultados.

4.4.2.4. Análise da ruptura e cinética da fissuração

A ruptura das juntas secas com um dente de cisalhamento ocorreu em duas etapas. Na primeira, fissuras surgiram na base do dente, se propagando para o meio da peça a um ângulo de aproximadamente 45 graus. Na segunda, fissuras surgiram no plano de cisalhamento do dente. Em um instante próximo a carga de ruptura, todas as fissuras no plano de cisalhamento se uniram e a ruptura se deu seguida de um elevado deslizamento e diminuição da carga. Comportamento similar ao visto por outros pesquisadores em juntas secas de concreto convencional.

As Figuras 81 a 88 mostram a cinética da fissuração até a ruptura das juntas com um dente de cisalhamento, com suas proporções de cargas em relação à carga de ruptura (V_u).

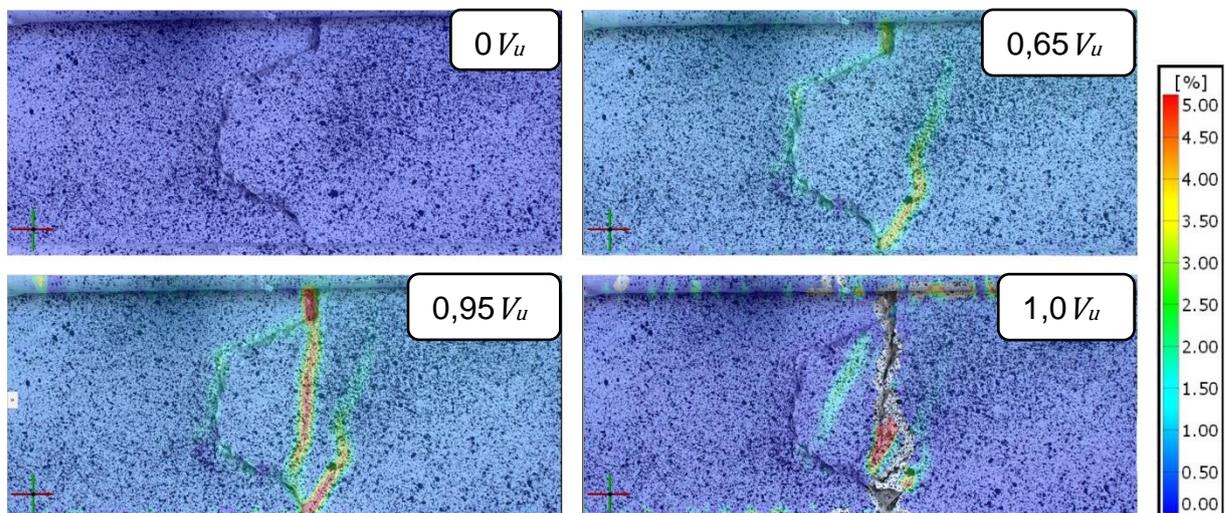


Figura 81 – Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-1,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.

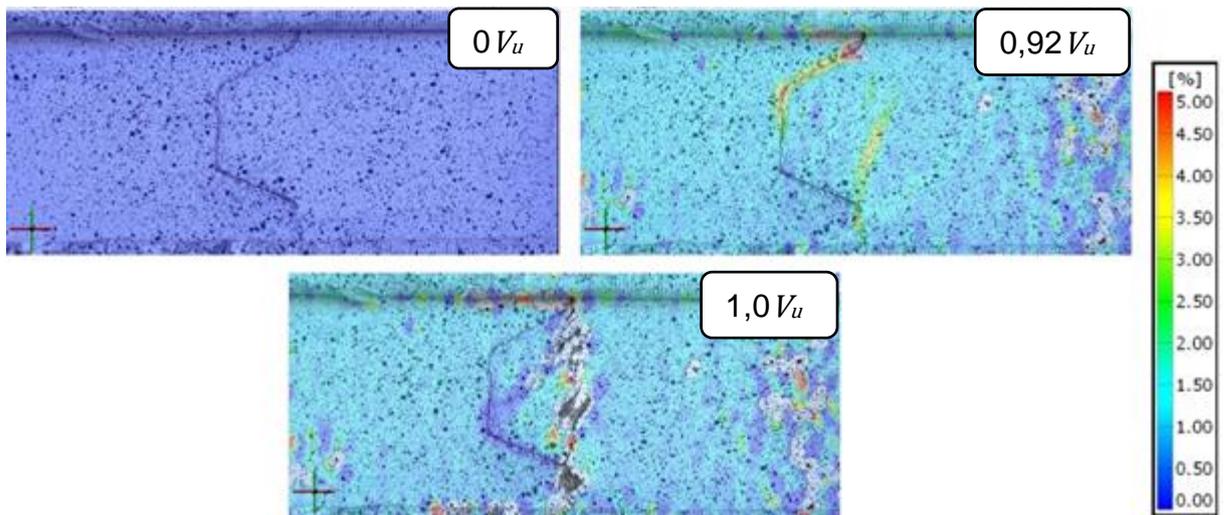


Figura 82 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-1,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.

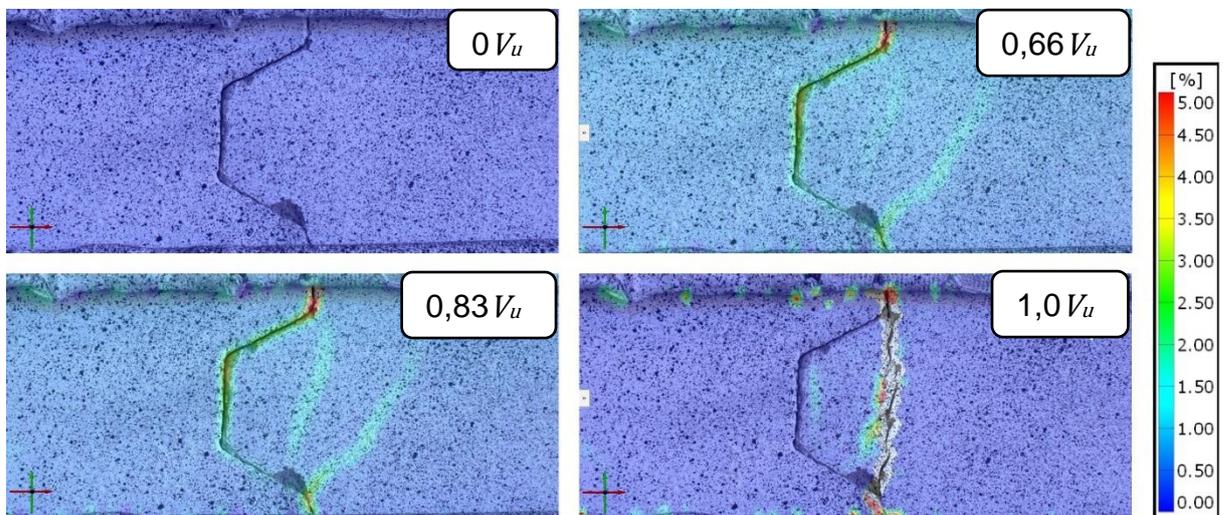


Figura 83 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-1-1,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.

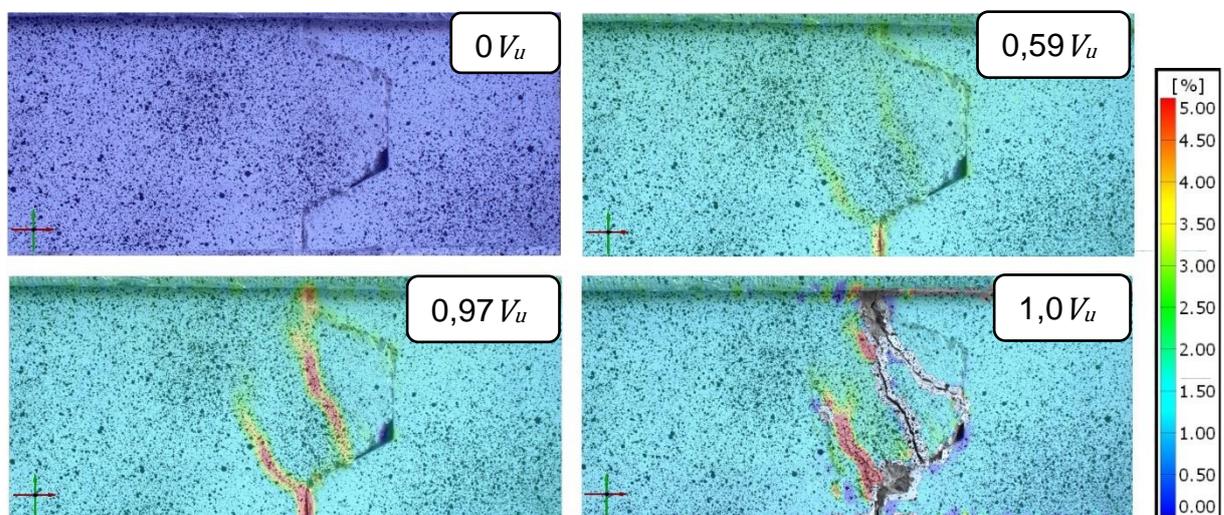


Figura 84 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-2,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.

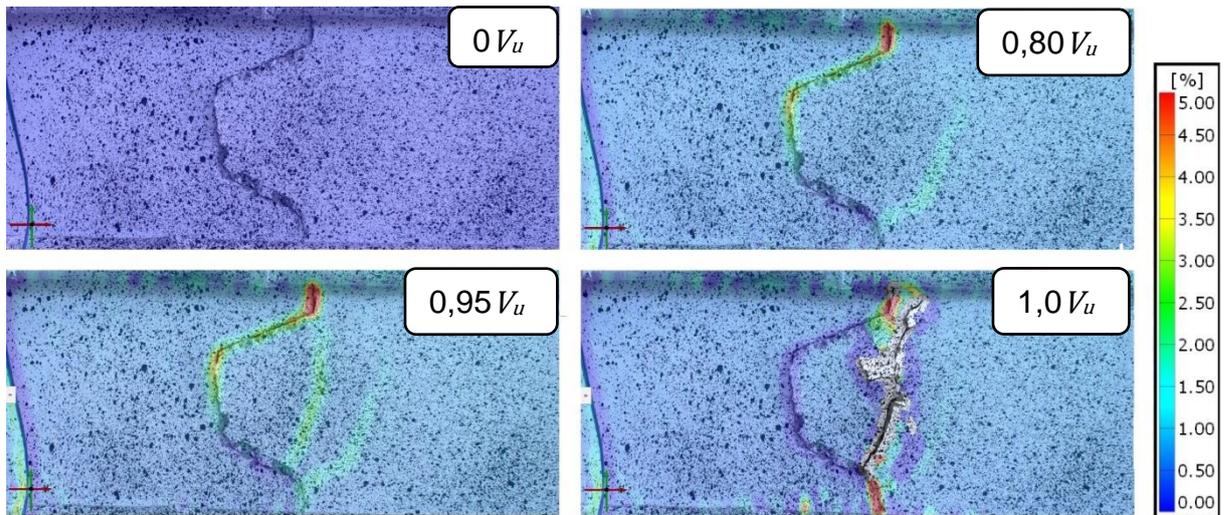


Figura 85 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-2,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.

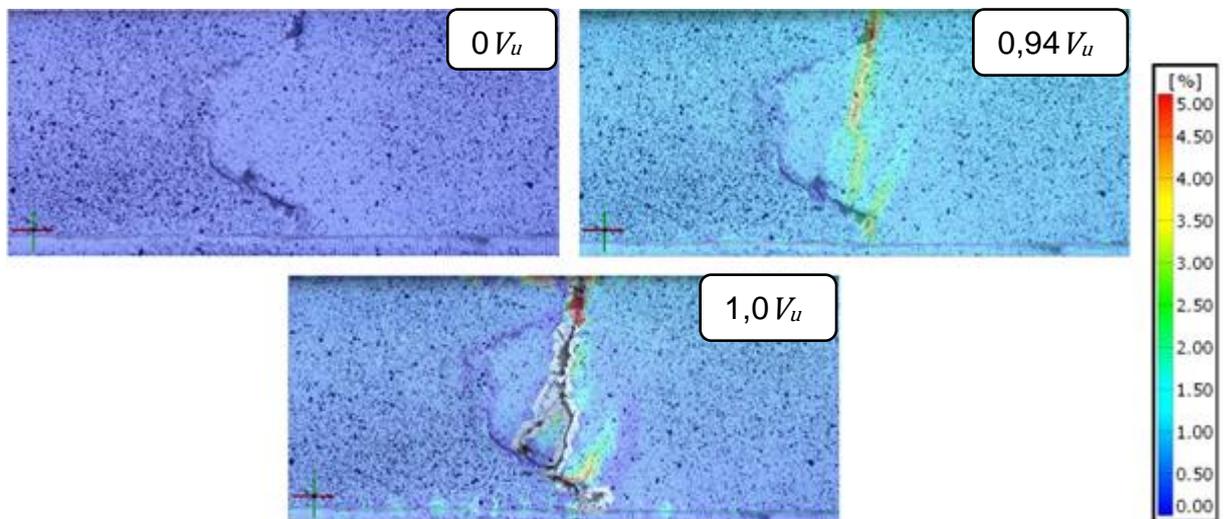


Figura 86 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-3,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.

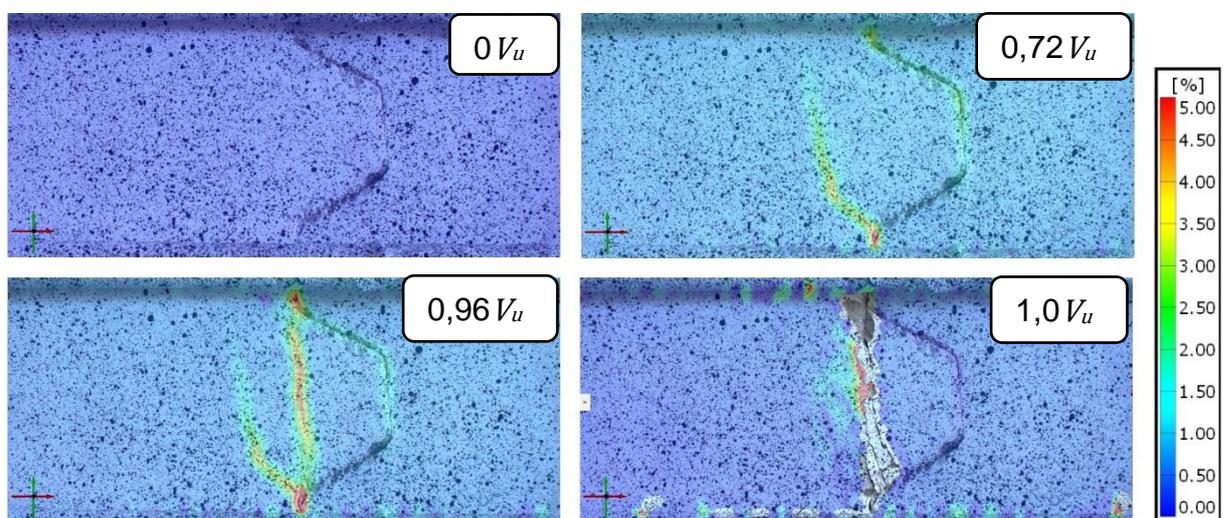


Figura 87 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-3,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.

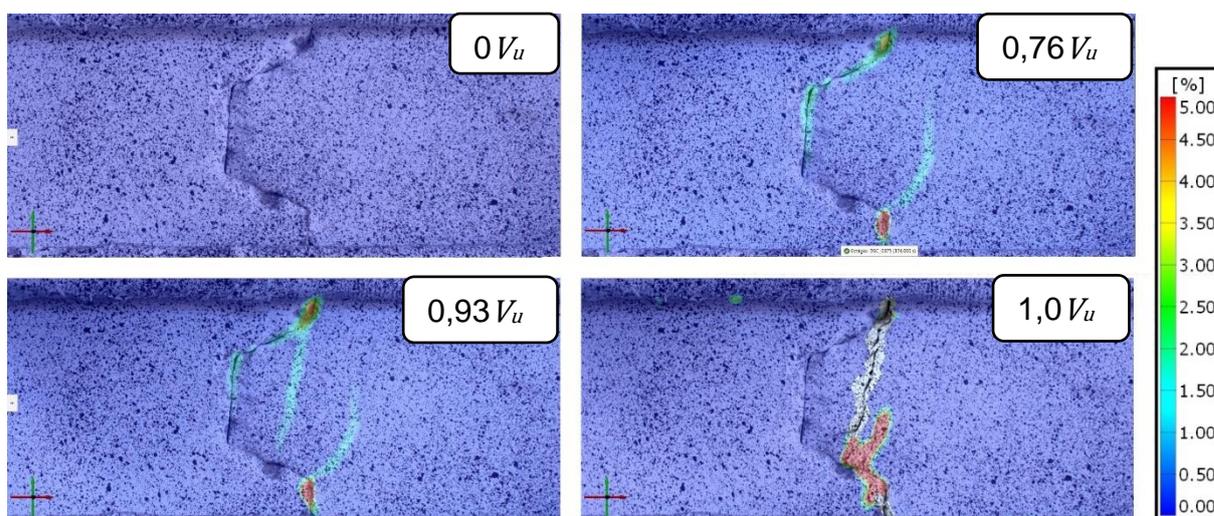


Figura 88 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-1-3,0 de junta seca com um dente de cisalhamento.

Observou-se que os corpos-de-prova atingiram a carga de ruptura no instante em que surgiu uma fissura no plano de cisalhamento. A fissura que surgiu prematuramente na base a aproximadamente 45 graus não é a fissura que define a carga de ruptura, embora os esforços principais de tração que ali ocorrem superaram a resistência à tração direta do concreto para estágios intermediários de carregamento.

A Tabela 32 mostra os valores da carga que provocaram o surgimento da fissura inclinada a 45 graus ($V_{f,45}$) e a fissura de ruptura a 90 graus (V_{fr}) e seus respectivos deslizamentos.

Tabela 32 - Carga de surgimento da fissura inclinada a 45 graus e da fissura de ruptura nos corpos-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento e seus respectivos deslizamentos.

Corpo-de-prova	V_u (kN)	$V_{f,45}$ (kN)	V_{fr} (kN)	Deslizamento fissura 45 (mm)	Deslizamento fissura 90 (mm)
CPR1-1-1,0	81,95	37,72	56,16	0,11	0,32
CPR1-1-2,0	101,05	46,30	57,20	0,17	0,27
CPR1-1-3,0	117,36	79,26	94,97	0,19	0,30
CPR2-1-1,0	96,45	45,27	65,24	0,46	0,62
CPR2-1-2,0	108,73	65,37	98,77	0,49	0,73
CPR2-1-3,0	117,95	50,36	90,88	0,13	0,27
CPR3-1-1,0	80,15	31,93	62,31	0,24	0,45
CPR3-1-3,0	110,01	69,04	88,52	0,79	1,08

A Figura 89 apresenta uma comparação gráfica entre as tensões normalizadas para o instante de aparição da fissura inclinada na base do dente ($\tau_{nf,45}$), a tensão normalizada no instante da aparição da fissura de ruptura no plano de cisalhamento (τ_{nfr}) e a tensão normalizada para a carga máxima (τ_{un}).

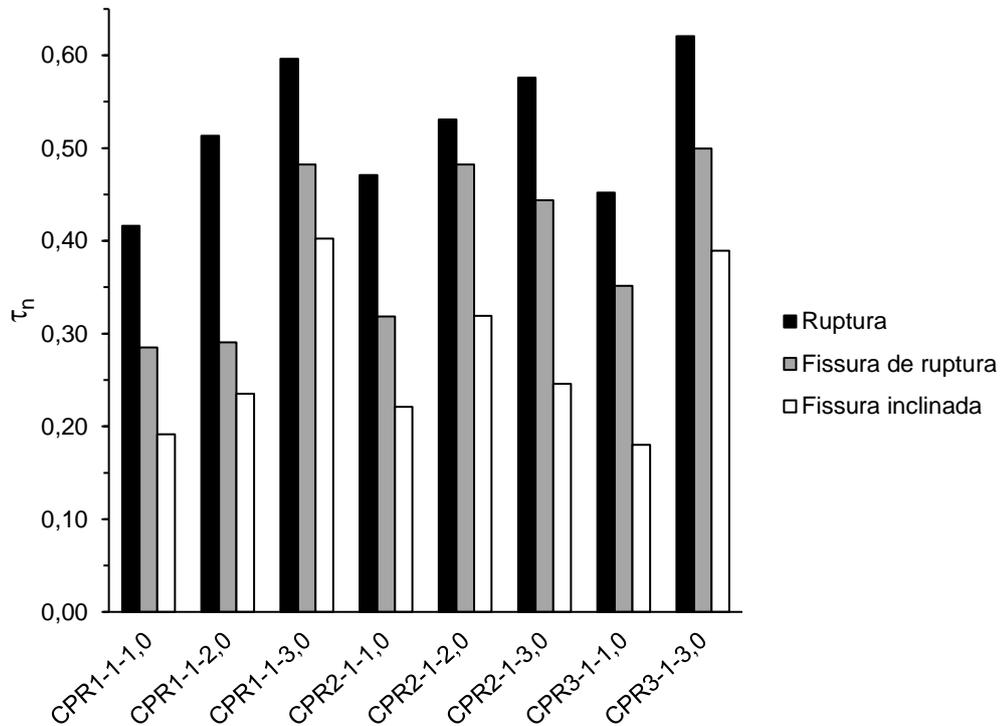


Figura 89 – Comparação entre as tensões normalizadas dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas com um dente de cisalhamento.

A Tabela 33 mostra os valores da tensão de cisalhamento normalizada que provocaram o surgimento da fissura inclinada a 45 graus ($\tau_{nf,45}$) e a fissura de ruptura (τ_{nfr}) e suas respectivas relações com a tensão de cisalhamento normalizada máxima (τ_{un}).

Tabela 33 - Carga de surgimento da fissura inclinada a 45 graus e da fissura vertical nos corpos-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento e suas respectivas relações com a carga de ruptura do dente.

Corpo-de-prova	τ_{un}	$\tau_{nf,45}$	τ_{nfr}	$\tau_{nf,45}/\tau_{un}$	τ_{nfr}/τ_{un}
CPR1-1-1,0	0,42	0,19	0,29	0,46	0,69
CPR1-1-2,0	0,51	0,24	0,29	0,46	0,57
CPR1-1-3,0	0,60	0,40	0,48	0,68	0,81
CPR2-1-1,0	0,47	0,22	0,32	0,47	0,68
CPR2-1-2,0	0,53	0,32	0,48	0,60	0,91
CPR2-1-3,0	0,58	0,25	0,44	0,43	0,77
CPR3-1-1,0	0,45	0,18	0,35	0,40	0,78
CPR3-1-3,0	0,62	0,39	0,50	0,63	0,80

Os resultados mostraram que a fissura inclinada a 45 graus na base do dente surgiu em valores de carga de cerca de 40% a 68% da carga de ruptura da junta, enquanto a fissura de ruptura surgiu com cerca de 57% a 91% da carga máxima de ruptura.

A Figura 90 mostra a influência da tensão de confinamento na relação entre $\tau_{nf,45}$ e τ_{un} das juntas secas com um dente de cisalhamento.

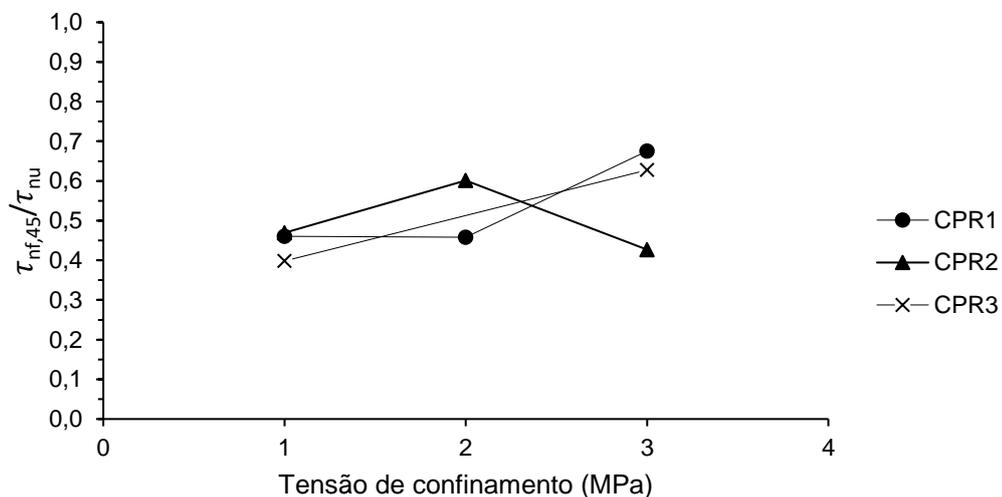


Figura 90 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura a 45 graus e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com um dente de cisalhamento.

A Figura 91 mostra a influência da tensão de confinamento na relação entre τ_{nfr} e τ_{un} das juntas secas com um dente de cisalhamento.

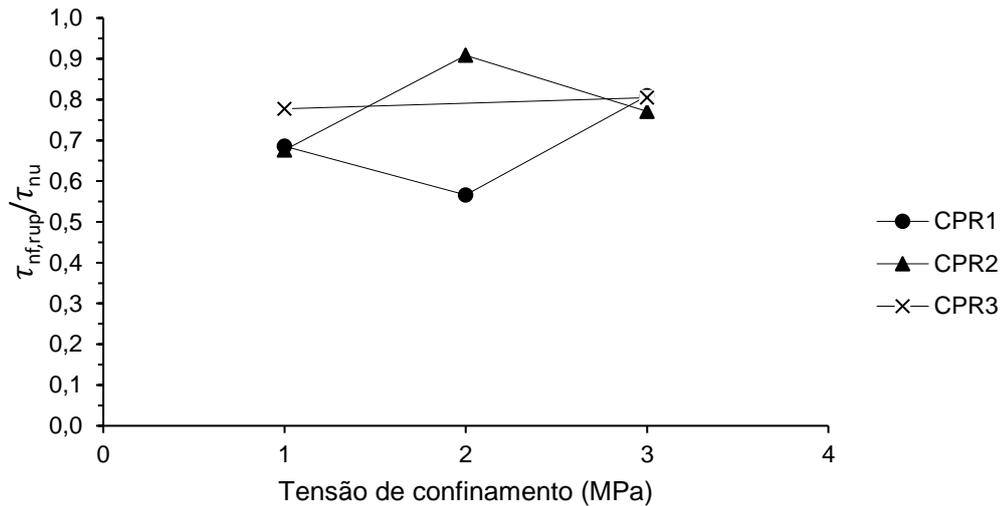


Figura 91 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura de ruptura e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com um dente de cisalhamento.

Percebe-se que os corpos-de-prova número dois, referentes ao grupo 3 ($f_{cm} = 46,59$ MPa) apresentaram tendência de aumento da relação entre a carga de surgimento das fissuras, inclinadas e de ruptura, com a carga máxima quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa, porém, essa relação diminuiu quando aumentou de 2 MPa para 3 MPa. O contrário ocorreu nos corpos-de-prova número 1, referentes ao grupo 1 ($f_{cm} = 43,06$ MPa), onde observou-se diminuição da relação quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa, porém houve aumento da relação quando aumentou de 2 MPa para 3 MPa. Os corpos-de-prova número 3, referentes ao grupo 3 ($f_{cm} = 34,90$ MPa) apresentaram aumento da relação quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Não fica evidente uma relação entre o aumento da tensão de confinamento na carga de surgimento das fissuras.

As Figuras 92 a 99 mostram a análise da abertura das fissuras inclinadas e de ruptura dos corpos-de-prova de junta seca com um dente de cisalhamento.

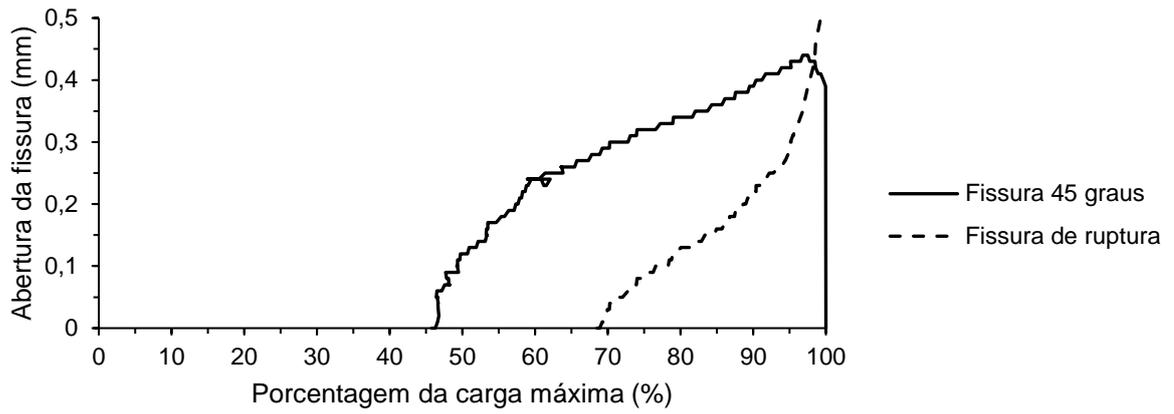


Figura 92 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-1,0 de junta seca.

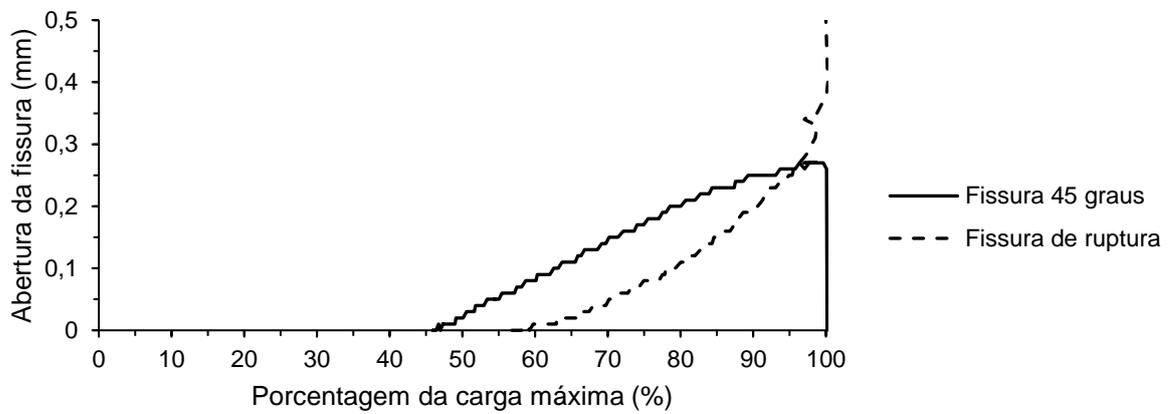


Figura 93 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-2,0 de junta seca.

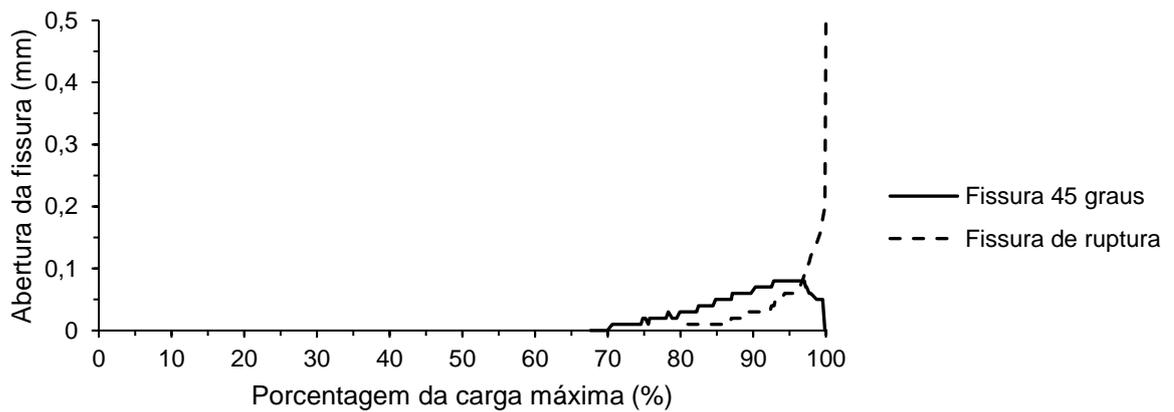


Figura 94 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR1-1-3,0 de junta seca.

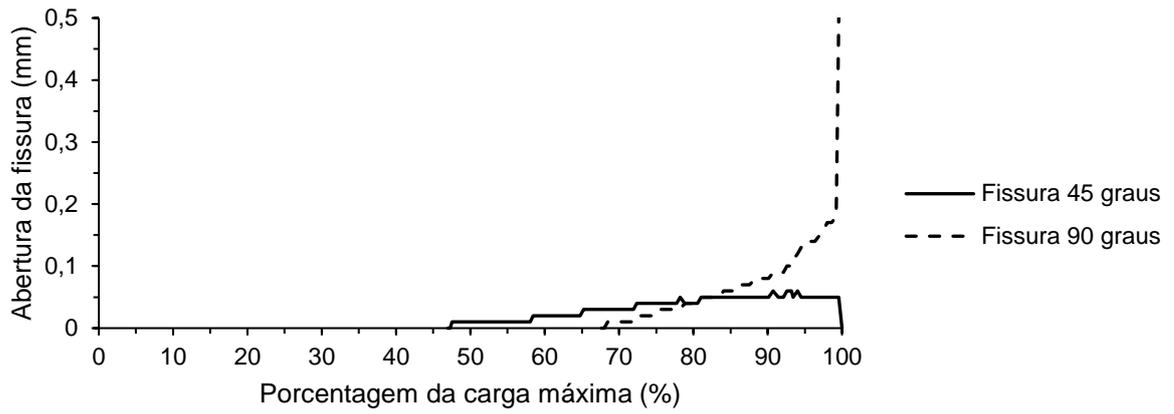


Figura 95 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-1,0 de junta seca.

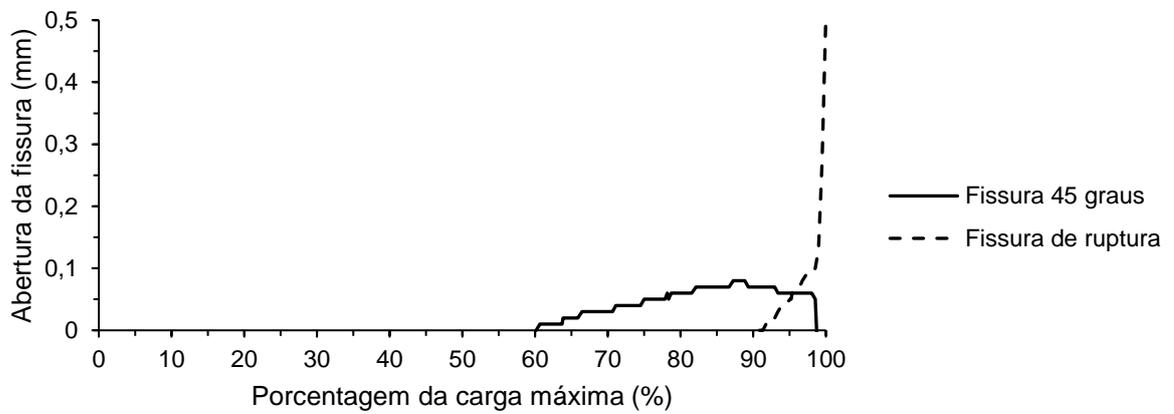


Figura 96 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-2,0 de junta seca.

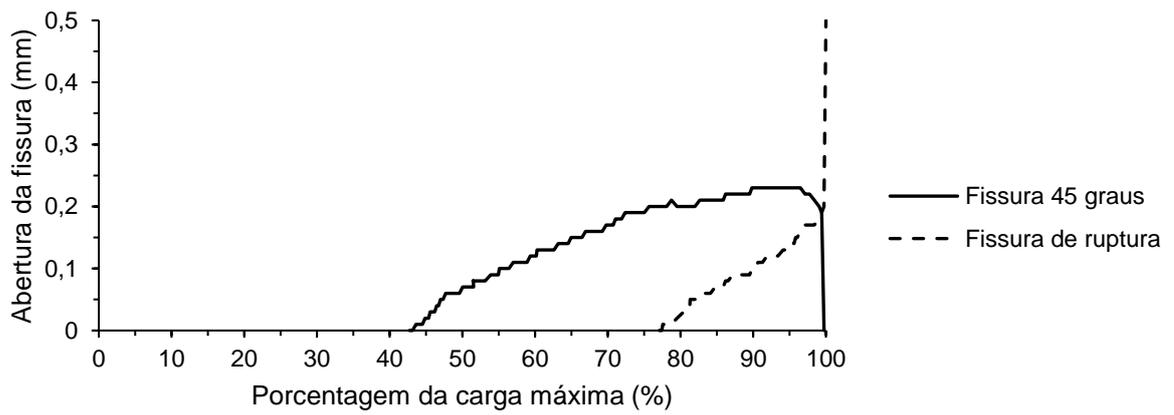


Figura 97 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR2-1-3,0 de junta seca.

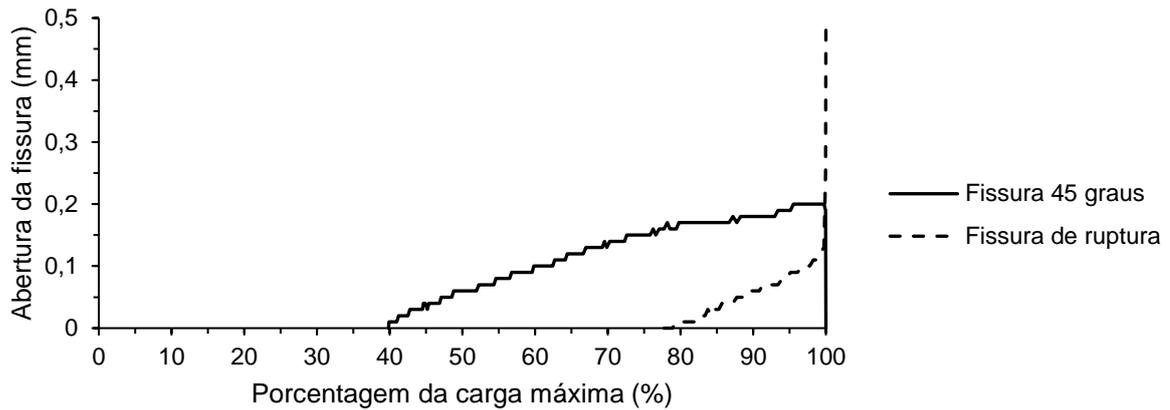


Figura 98 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR3-1-1,0 de junta seca.

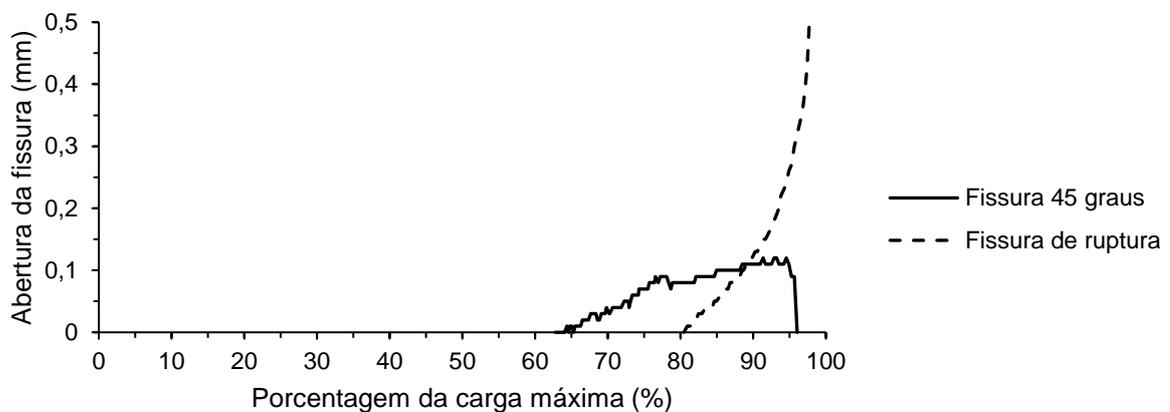


Figura 99 - Abertura da fissura de 45 graus e de ruptura do corpo-de-prova CPR3-1-3,0 de junta seca.

Os resultados mostraram que a fissura de ruptura possuiu uma cinética de abertura similar à fissura inclinada a 45 graus, sendo seu surgimento mais tardio. No instante em que o dente de cisalhamento rompe, observa-se que a fissura na base se fecha enquanto a fissura de ruptura apresenta um elevado aumento. Observa-se, também, uma tendência do aumento da tensão de confinamento influenciar na cinética de abertura das fissuras, sendo estas mais acentuadas nas tensões de confinamento da ordem de 1 MPa, e menos acentuadas na ordem de 3 MPa.

4.4.3. Juntas secas com três dentes

Os resultados dos ensaios de ruptura das juntas secas com três dentes de cisalhamento estão reunidos na Tabela 34.

Tabela 34 - Resultados dos ensaios de ruptura das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

Grupos	f_{cm} (MPa)	Corpo-de-prova	Carga máxima V_u (kN)	τ_u (MPa)	$\tau_u / \sqrt{f_{cm}}$ (MPa)
Grupo 1	34,90	CPR1-3-1,0	173,64	3,47	0,59
		CPR1-3-2,0	*	*	*
		CPR1-3-3,0	260,84	5,22	0,88
Grupo 2	43,06	CPR3-3-1,0	173,82	3,48	0,53
		CPR3-3-2,0	235,19	4,70	0,72
		CPR3-3-3,0	242,15	4,84	0,74
Grupo 3	46,59	CPR2-3-1,0	193,59	3,87	0,57
		CPR2-3-2,0	222,64	4,45	0,65
		CPR2-3-3,0	266,88	5,34	0,78

* Erro no ensaio do corpo-de-prova.

A tensão de cisalhamento última foi obtida dividindo a carga de ruptura pela área do plano de cisalhamento da junta seca com três dentes (50.000 mm²).

Os resultados mostraram um aumento da carga de ruptura conforme aumentou a tensão de confinamento. Esse aumento foi mais acentuado nos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_{cm} = 43,06$ MPa), com 35% de aumento quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa e 39% quando aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Nos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_{cm} = 46,59$ MPa) o aumento foi de 15% quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa e 37% quando aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Nos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_{cm} = 34,90$ MPa) o aumento foi de 50% quando a tensão confinante aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Esses resultados estão resumidos na Tabela 35.

Tabela 35 - Percentual de aumento da carga de ruptura devido ao aumento da tensão de confinamento nos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes de cisalhamento.

Aumento da tensão de confinamento de: (MPa)	Grupo 1 (%)	Grupo 2 (%)	Grupo 3 (%)
1 → 2	*	35,28	15,01
1 → 3	50,21	39,31	37,82
2 → 3	*	2,98	19,83

* Análise inválida devido ao erro no ensaio do corpo-de-prova (CPR3-3-2,0).

4.4.3.1. Influência da tensão de confinamento

As Figuras 100, 101 e 102 mostram as curvas de carga *versus* deslizamento dos ensaios de ruptura dos corpos-de-prova do tipo *push-off* dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente, de juntas secas com três dentes de cisalhamento, para as tensões de confinamento de 1, 2 e 3 MPa.

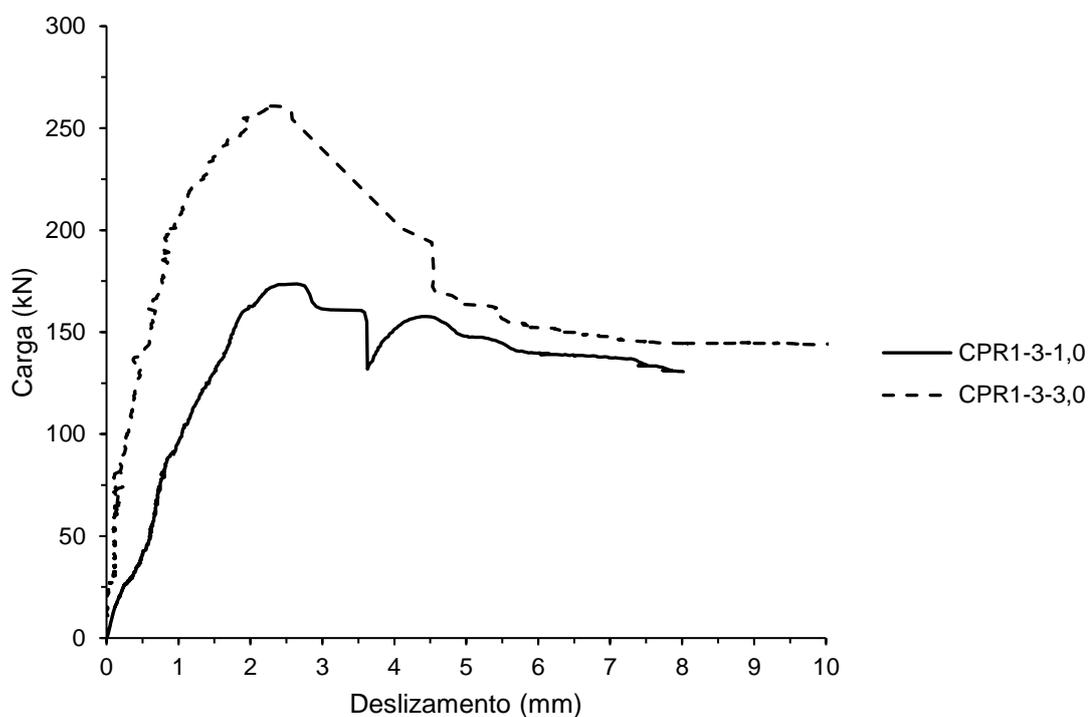


Figura 100 - Curva carga *versus* deslizamento vertical das juntas secas com três dentes de cisalhamento do grupo 1.

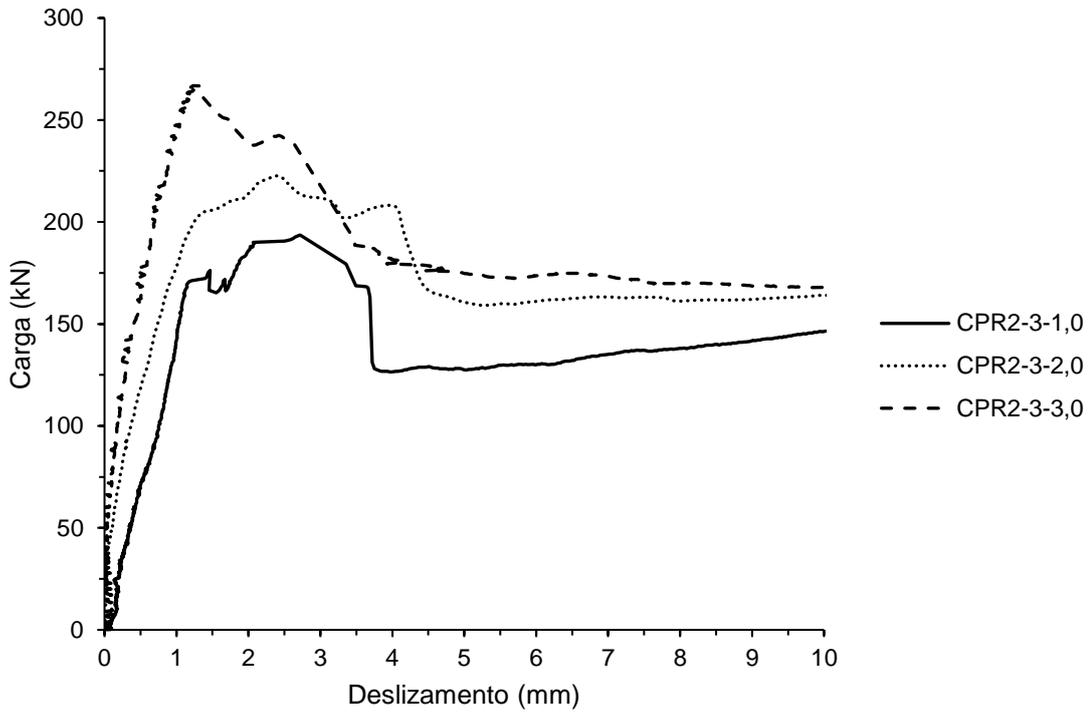


Figura 101 - Curva carga *versus* deslocamento vertical das juntas secas com três dentes de cisalhamento do grupo 2.

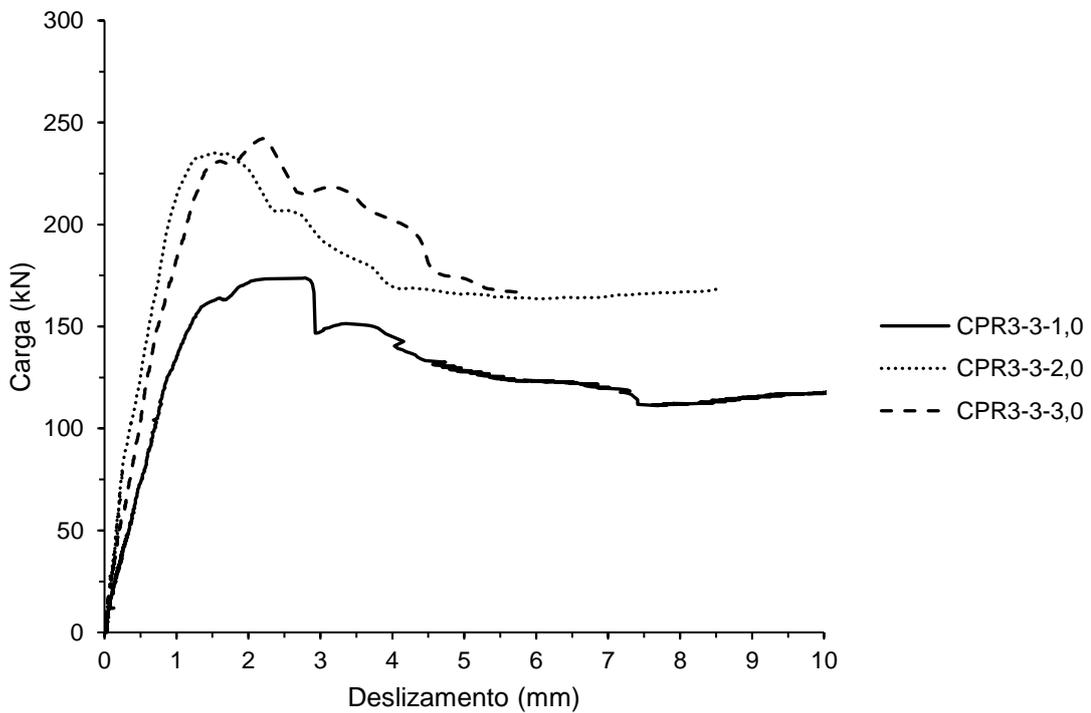


Figura 102 - Curva carga *versus* deslocamento vertical das juntas secas com três dentes de cisalhamento do grupo 3.

Assim como nas juntas com um dente, as juntas secas com três dentes de cisalhamento apresentaram o aumento da carga junto ao deslizamento. Em certo

ponto do ensaio observou-se um aumento do deslizamento perante o incremento da carga, se mantendo até a ruptura da junta. Após a ruptura da junta observou-se a diminuição da carga.

4.4.3.2. Resistência residual

A Figura 103 mostra uma junta seca com três dentes de cisalhamento rompida.



Figura 103 – Corpo-de-prova de junta seca com três dentes de cisalhamento rompida.

A Tabela 36 mostra a relação entre a carga residual e a carga máxima (V_r/V_u), onde (V_r) é definida como a média entre a carga pós-pico ($V_{r,pós}$) e a carga residual para o deslizamento de 10 mm ($V_{r,10mm}$).

Tabela 36 - Relação entre a resistência residual e de ruptura das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

Corpo-de-prova	V_u	$V_{r,pós}$	$V_{r,10mm}$	V_r	V_r/V_u
CPR1-3-1,0	173,64	131,80	129,43	130,62	0,75
CPR1-3-3,0	260,84	168,07	144,10	156,09	0,60
CPR2-3-1,0	193,59	127,07	145,15	136,11	0,70
CPR2-3-2,0	222,64	162,63	164,02	163,33	0,73
CPR2-3-3,0	266,88	179,53	168,12	173,83	0,65
CPR3-3-1,0	173,82	124,01	129,44	126,73	0,73
CPR3-3-2,0	235,19	168,74	168,24	168,49	0,72
CPR3-3-3,0	242,16	174,93	167,27	171,10	0,71

Os resultados mostraram que as resistências residuais das juntas secas com três dentes de cisalhamento estão na faixa de 60% a 75% da resistência de ruptura da junta.

4.4.3.3. Análise da tensão de cisalhamento normalizada

As Figuras 104, 105 e 106 mostram as curvas de tensão de cisalhamento normalizada (τ_n) versus deslizamento dos ensaios de ruptura dos corpos-de-prova do tipo *push-off* das juntas secas com três dentes de cisalhamento para as tensões de confinamento de 1, 2 e 3 MPa, respectivamente.

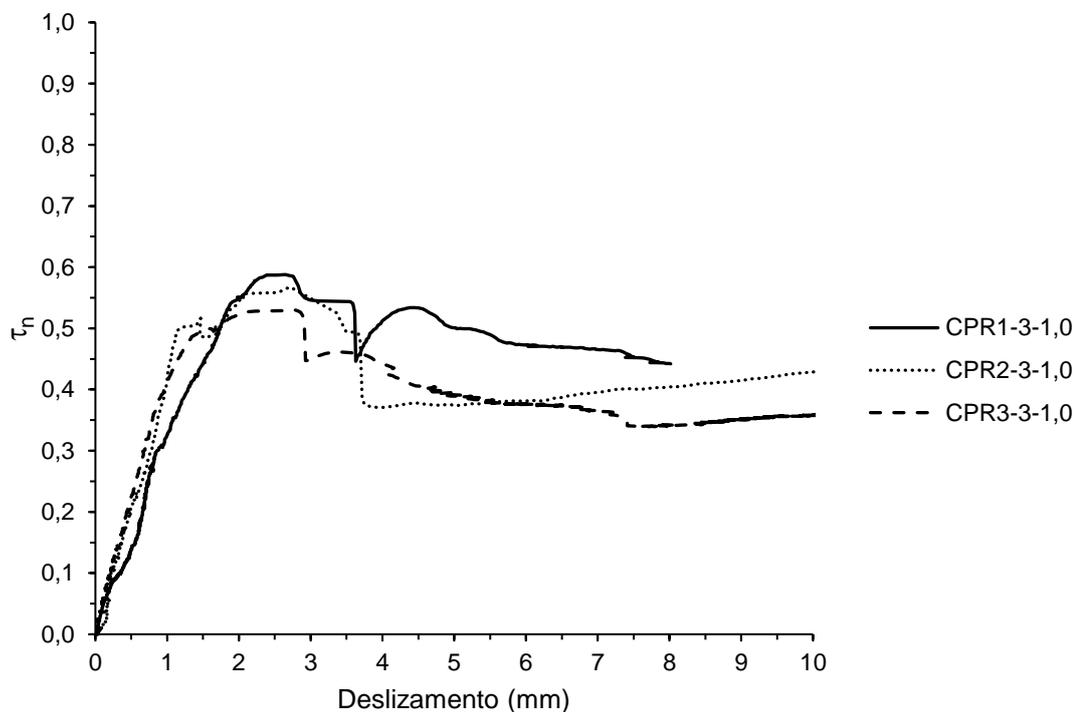


Figura 104 - Curva tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes para a tensão de confinamento de 1 MPa.

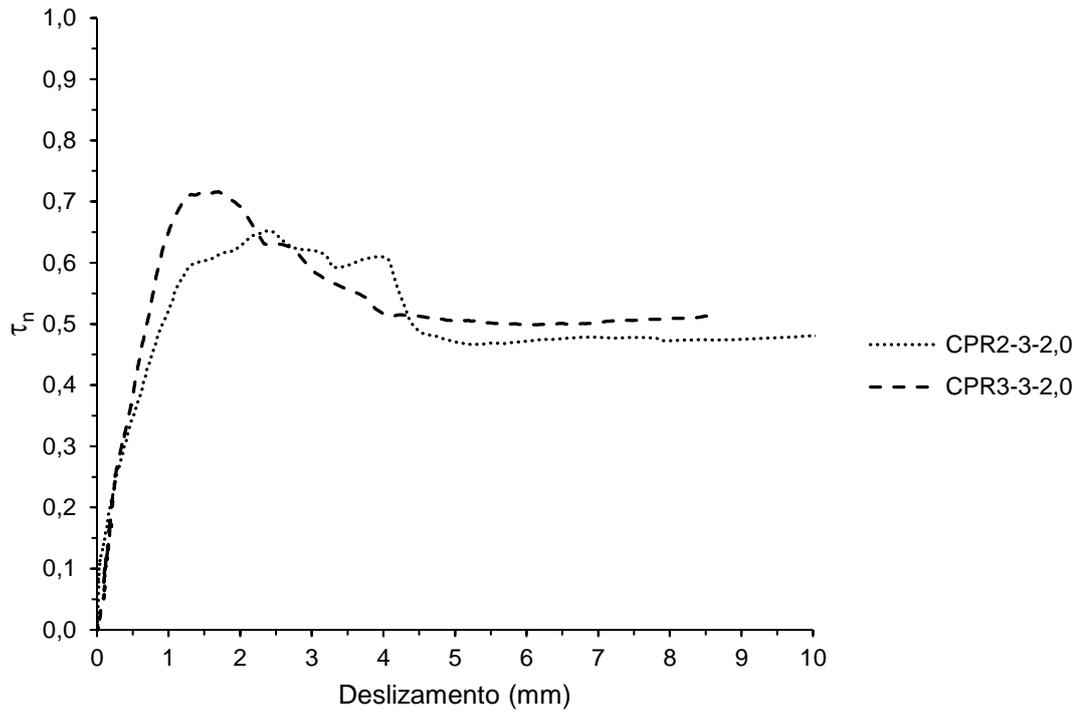


Figura 105 - Curva tensão de cisalhamento normalizada *versus* deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes para a tensão de confinamento de 2 MPa.

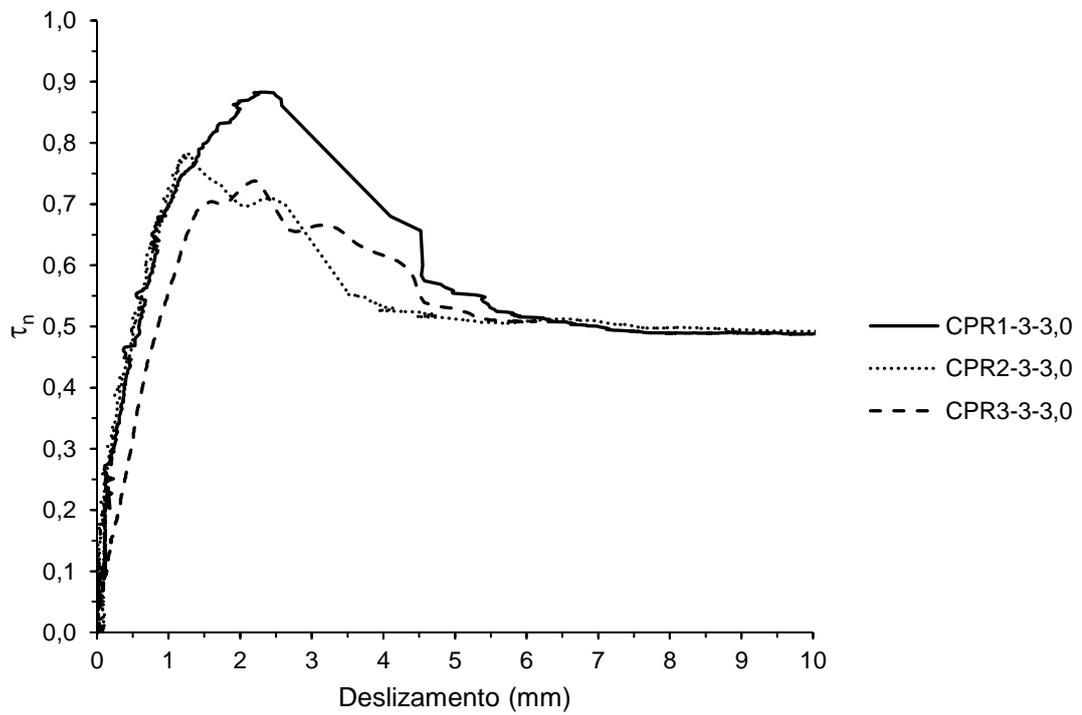


Figura 106 - Curva tensão de cisalhamento normalizada *versus* deslizamento vertical dos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes para a tensão de confinamento de 3 MPa.

Os resultados mostraram que o aumento da tensão de confinamento influenciou no aumento da carga máxima de ruptura das juntas secas com três dentes de cisalhamento. Além disso, notou-se uma tendência da ruptura da junta ocorrer em valores de deslizamento menores conforme o aumento da tensão de confinamento, semelhante aos corpos-de-prova com um dente, como mostra a Tabela 37.

Tabela 37 - Deslizamentos na ruptura dos corpos-de-prova de junta seca com três dentes de cisalhamento.

Corpo-de-prova	Deslizamento de ruptura (mm)
CPR1-3-1,0	2,64
CPR1-3-3,0	2,28
CPR2-3-1,0	2,72
CPR2-3-2,0	2,40
CPR2-3-3,0	1,23
CPR3-3-1,0	2,79
CPR3-3-2,0	1,51
CPR3-3-3,0	2,20

Percebe-se uma tendência das juntas secas com três dentes de cisalhamento do grupo de concreto com menor resistência apresentarem os maiores valores de deslizamento na ruptura, como ocorreu nas juntas com um dente.

Assim como nas juntas secas com um dente de cisalhamento, fez-se necessário a normalização da tensão de cisalhamento última em relação à raiz quadrada da resistência à compressão do concreto.

A Figura 107 mostra os valores das tensões de cisalhamento normalizada máximas (τ_{un}) versus tensão de confinamento das juntas secas com três dentes de cisalhamento, com a identificação do tipo de corpo-de-prova.

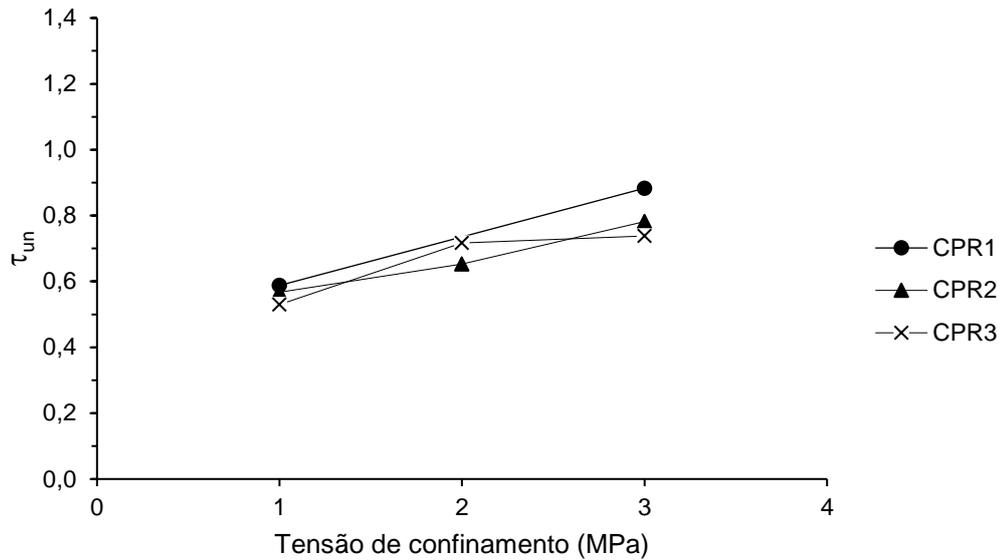


Figura 107 - Tensão de cisalhamento normalizada dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas com três dentes de cisalhamento.

Embora os valores não sejam apropriadamente próximos para uma mesma tensão confinante, é preferível considerar a média dos valores para fins comparativos.

A Tabela 38 mostra alguns parâmetros estatísticos das médias das tensões de cisalhamento normalizadas máximas dos corpos-de-prova de juntas secas com três dentes de cisalhamento ($\tau_{un,m}$) e a Figura 108 mostra a influência das tensões de confinamento no aumento das médias das tensões de cisalhamento normalizadas máximas.

Tabela 38 - Parâmetros estatísticos da tensão de cisalhamento normalizada das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

Tensão de confinamento	$\tau_{un,m}$	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
1 MPa	0,56	0,029	5,18
2 MPa	0,68	0,045	6,62
3 MPa	0,80	0,074	9,25

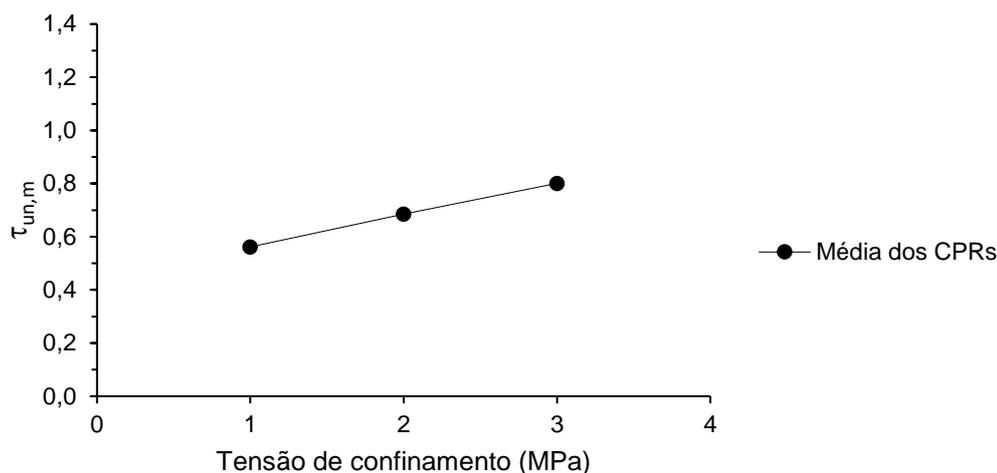


Figura 108 - Média dos valores da tensão de cisalhamento normalizada das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

Assim como nas juntas com um dente, os resultados mostraram que a tensão de confinamento desempenhou um papel importante no aumento da tensão de cisalhamento normalizada máximas das juntas secas com três dentes de cisalhamento. Esse aumento foi cerca de 21,43% quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa, cerca de 42,86% quando aumento de 1 MPa para 3 MPa e cerca de 17,65% quando aumentou de 2 MPa para 3 MPa.

A Figura 109 mostra a curva média da tensão de cisalhamento normalizada ($\tau_{n,m}$) versus deslizamento das juntas secas com três dentes de cisalhamento, para as tensões de confinamento estudadas.

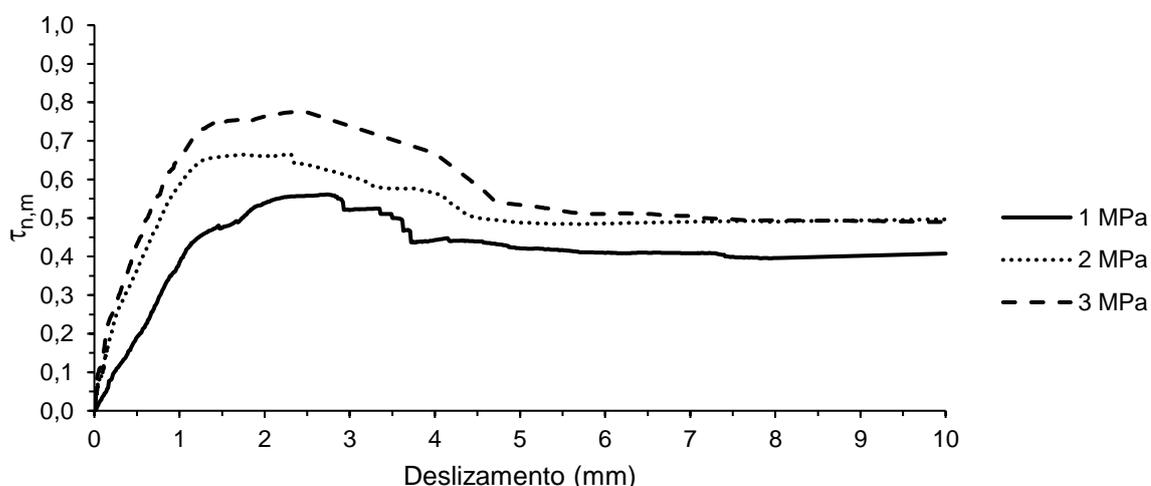


Figura 109 - Curva média da tensão de cisalhamento normalizada versus deslizamento das juntas secas com três dentes de cisalhamento, para as tensões de confinamento estudadas.

Os resultados mostraram um aumento da resistência das juntas secas com três dentes de cisalhamento conforme o aumento da tensão de confinamento. Além disso, notou-se um aumento da rigidez da junta conforme o aumento do confinamento, ocasionando a ruptura em valores de deslizamento menores.

4.4.3.4. Análise da ruptura e cinética da fissuração

A ruptura das juntas secas com três dentes se deu por falha em sequência dos dentes de cisalhamento. A ruptura iniciou com o surgimento de fissuras inclinadas aproximadamente a 45 graus na base dos dentes. Observou-se que estas fissuras inclinadas surgiram em apenas alguns corpos-de-prova. Conforme o aumento da carga, mais fissuras surgiram no plano de cisalhamento ao longo do dente. A ruptura da junta ocorreu primeiramente no dente localizado na parte inferior da junta, devido às tensões concentradas nesse ponto. Em seguida, a ruptura ocorreu em sequência nos outros dentes.

Essa forma de ruptura atribuiu uma característica dúctil, uma vez que, proporcionou uma redução menos brusca da carga, acompanhada pelo aumento gradativo do deslizamento.

As Figuras 110 a 117 mostram a cinética da fissuração até a ruptura das juntas com três dentes de cisalhamento, com suas proporções de cargas em relação à carga de ruptura (V_u).

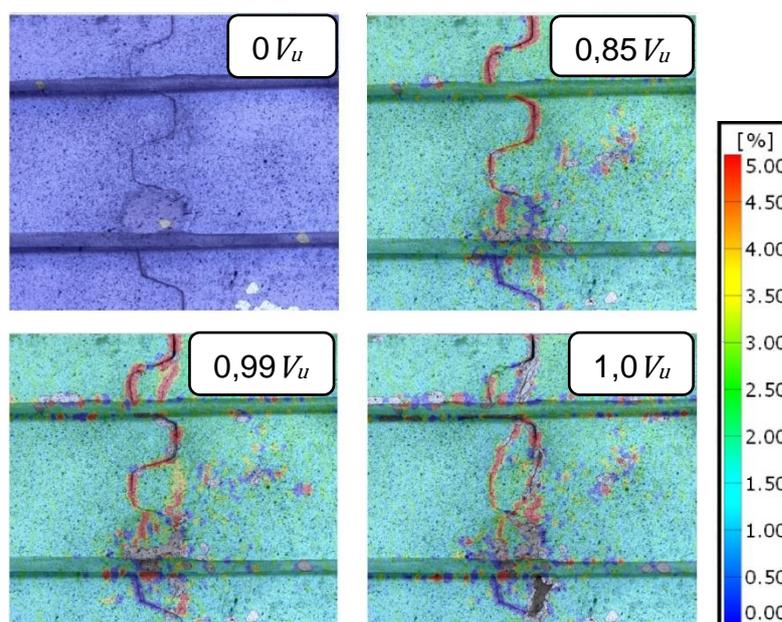


Figura 110 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-3-1,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.

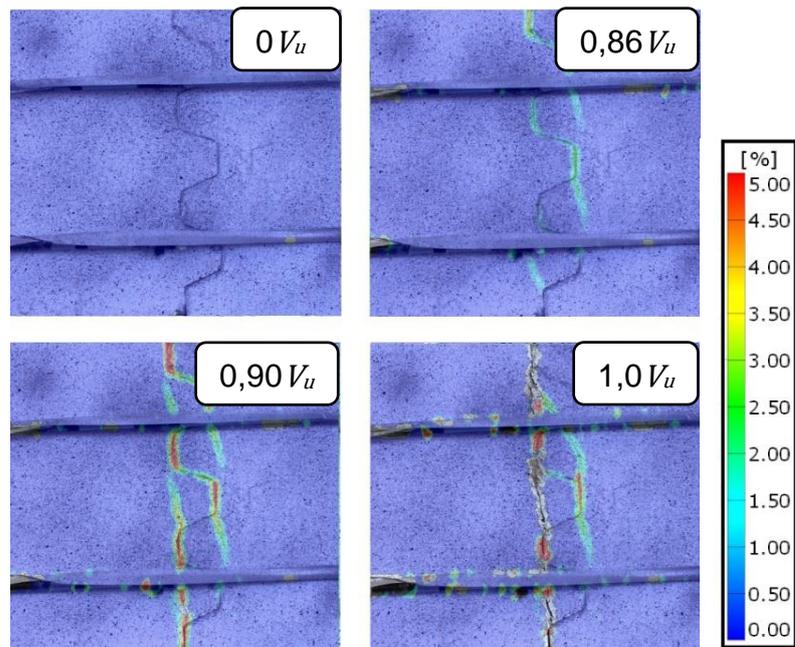


Figura 111 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-3-1,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.

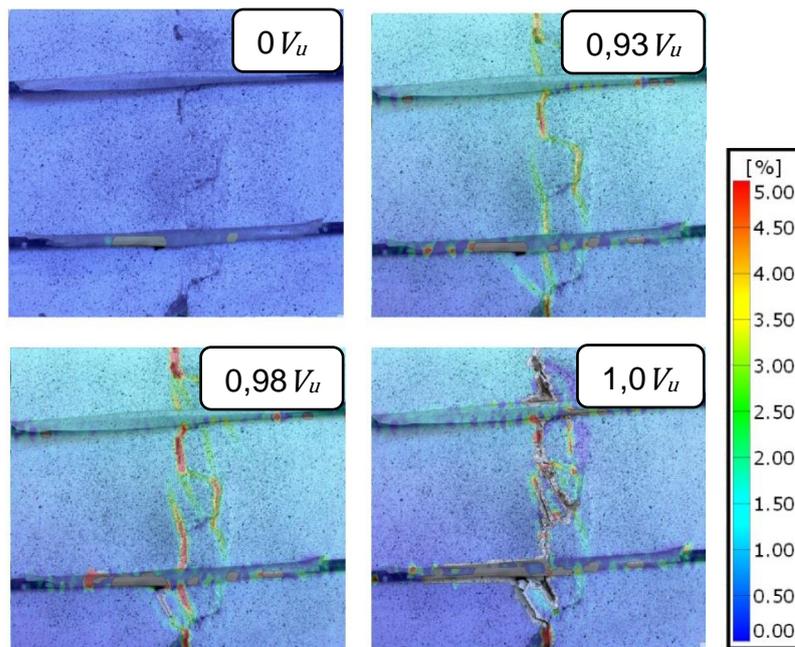


Figura 112 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-3-1,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.

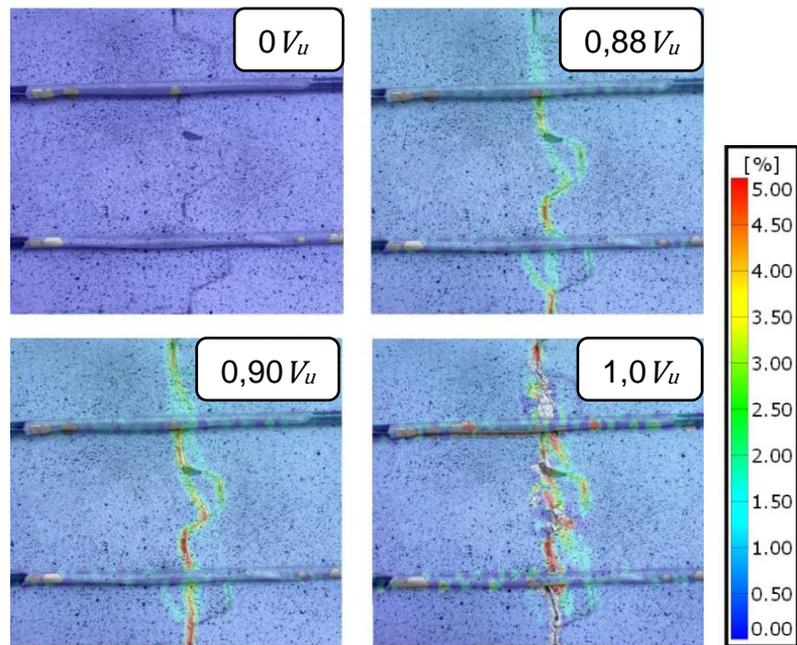


Figura 113 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-3-2,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.

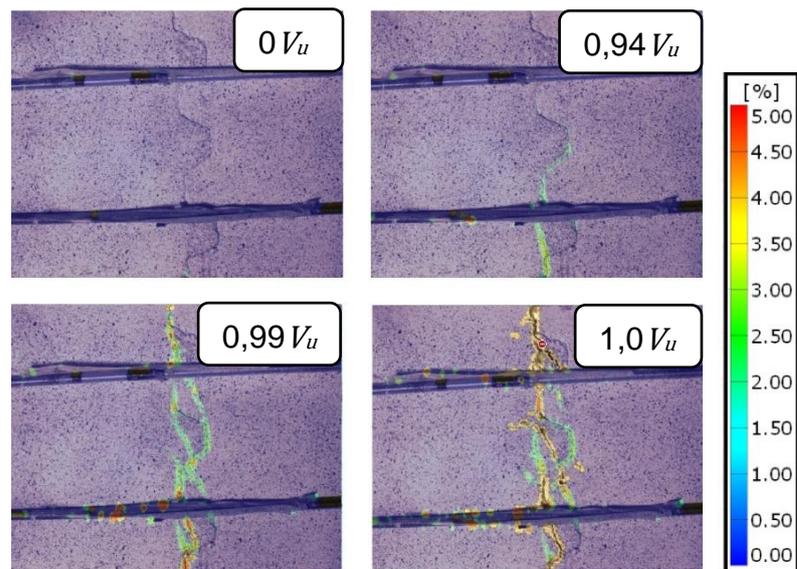


Figura 114 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-3-2,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.

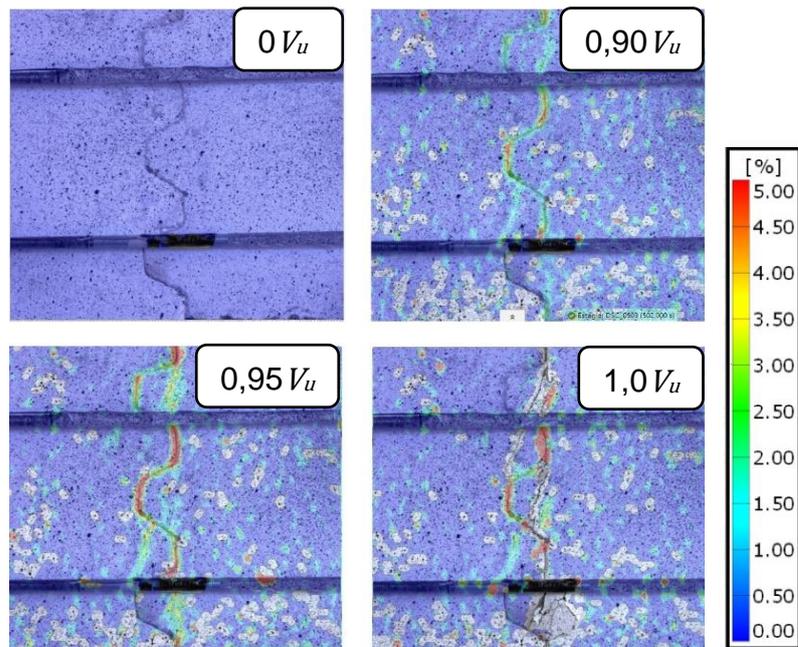


Figura 115 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR1-3-3,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.

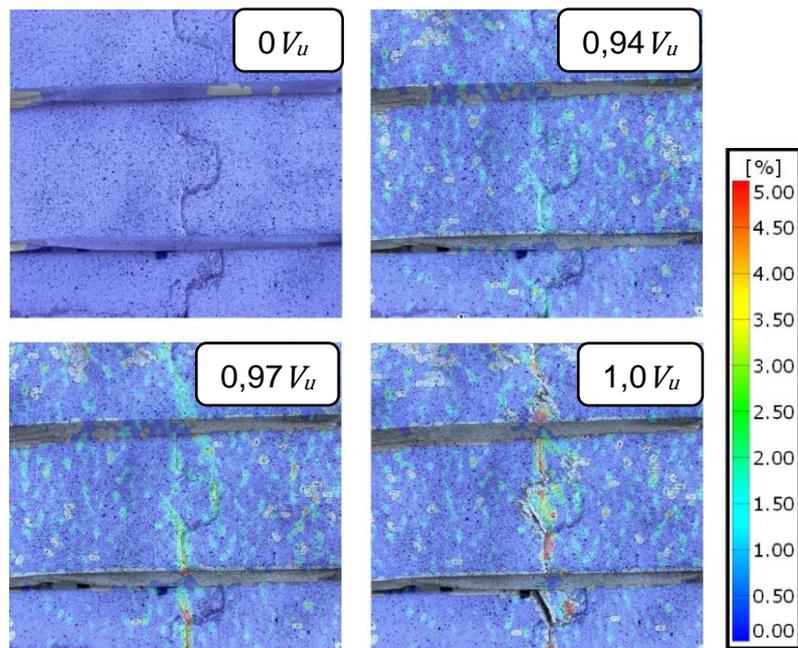


Figura 116 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR2-3-3,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.

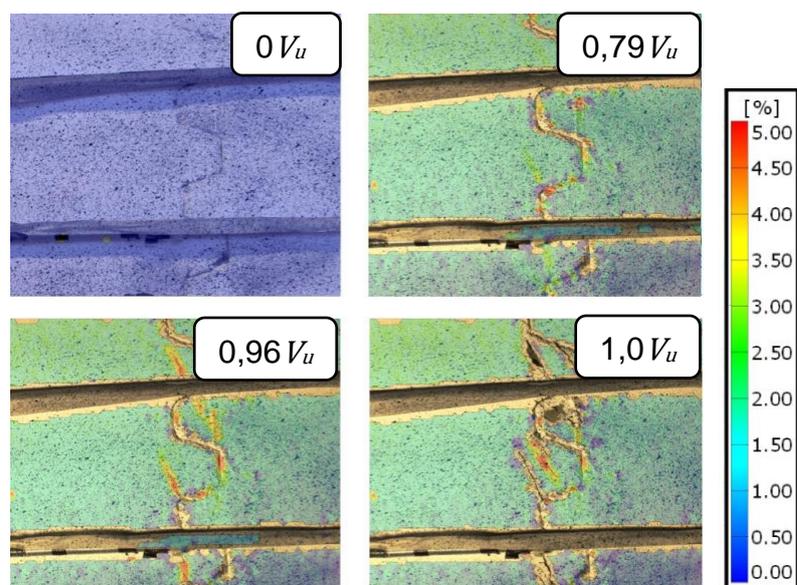


Figura 117 - Cinética da fissuração até a ruptura do corpo-de-prova CPR3-3-3,0 de junta seca com três dentes de cisalhamento.

Observou-se que os corpos-de-prova atingiram a carga de ruptura instantes após o surgimento das fissuras. A fissura que surgiu prematuramente na base do dente a aproximadamente 45 graus não está presente em todos os corpos-de-prova, por isso, as análises a seguir foram realizadas com base na fissura de ruptura que surge em cada dente. A contagem dos dentes foi estabelecida sendo o dente mais a baixo da junta como sendo o primeiro, o do meio sendo o segundo e por último o dente superior sendo o terceiro.

A Tabela 39 mostra os valores da carga que provocaram o surgimento da fissura de ruptura no primeiro dente ($V_{fr,1}$), no segundo dente ($V_{fr,2}$) e no terceiro dente ($V_{fr,3}$) e seus respectivos deslizamentos ($D_{fr,1}$, $D_{fr,2}$ e $D_{fr,3}$)

Tabela 39 - Carga de surgimento da fissura de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente nos corpos-de-prova de junta seca com três dentes de cisalhamento e seus respectivos deslizamentos.

Corpo-de-prova	V_u (kN)	$V_{fr,1}$ (kN)	$V_{fr,2}$ (kN)	$V_{fr,3}$ (kN)	$D_{fr,1}$ (mm)	$D_{fr,2}$ (mm)	$D_{fr,3}$ (mm)
CPR1-3-1,0	173,64	133,83	168,44	151,42	1,54	2,17	1,77
CPR1-3-3,0	260,83	226,62	257,02	236,51	1,35	2,11	1,53
CPR2-3-1,0	193,59	167,41	169,05	171,88	1,13	1,46	1,11
CPR2-3-2,0	222,64	194,17	195,66	211,60	1,16	1,18	1,29
CPR2-3-3,0	266,80	244,48	251,84	254,68	1,02	1,08	1,11
CPR3-3-1,0	173,82	132,19	170,09	163,35	0,96	1,92	1,63
CPR3-3-2,0	235,14	221,44	231,97	223,56	1,09	1,25	1,12
CPR3-3-3,0	242,16	219,52	193,72	229,46	1,33	1,10	1,49

A Figura 118 apresenta uma comparação entre as tensões normalizadas para o instante de aparição da fissura de ruptura no primeiro dente ($\tau_{nfr,1}$), no segundo dente $\tau_{nfr,2}$ e no terceiro dente $\tau_{nfr,3}$ e a tensão normalizada para a carga máxima (τ_{un}).

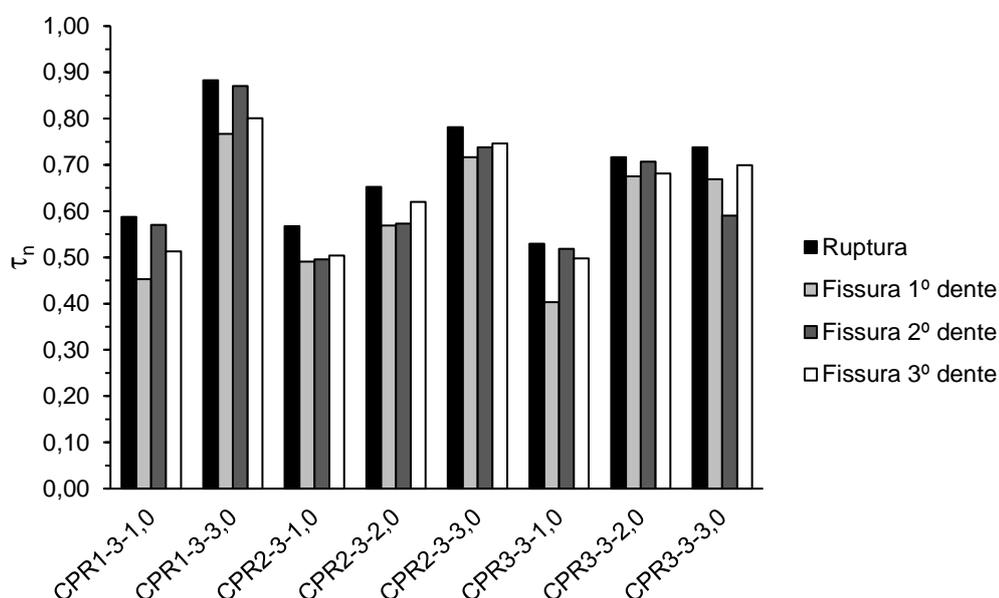


Figura 118 - Comparação entre as tensões normalizadas dos diferentes corpos-de-prova de juntas secas com três dentes de cisalhamento.

A Tabela 40 mostra os valores da tensão de cisalhamento normalizada que provocaram o surgimento da fissura de ruptura no primeiro dente ($\tau_{nfr,1}$), no segundo dente ($\tau_{nfr,2}$) e no terceiro dente ($\tau_{nfr,3}$) e suas respectivas relações com a tensão de cisalhamento normalizada máxima (τ_{un}).

Tabela 40 – Tensão de cisalhamento normalizada de surgimento da fissura de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente nos corpos-de-prova de junta seca com três dentes de cisalhamento.

Corpo-de-prova	τ_{un}	$\tau_{nfr,1}$	$\tau_{nfr,2}$	$\tau_{nfr,3}$	$\tau_{nfr,1}/\tau_{un}$	$\tau_{nfr,2}/\tau_{un}$	$\tau_{nfr,3}/\tau_{un}$
CPR1-3-1,0	0,59	0,45	0,57	0,51	0,77	0,97	0,87
CPR1-3-3,0	0,88	0,77	0,87	0,80	0,87	0,99	0,91
CPR2-3-1,0	0,57	0,49	0,50	0,50	0,86	0,87	0,89
CPR2-3-2,0	0,65	0,57	0,57	0,62	0,87	0,88	0,95
CPR2-3-3,0	0,78	0,72	0,74	0,75	0,92	0,94	0,95
CPR3-3-1,0	0,53	0,40	0,52	0,50	0,76	0,98	0,94
CPR3-3-2,0	0,72	0,67	0,71	0,68	0,94	0,99	0,95
CPR3-3-3,0	0,74	0,67	0,59	0,70	0,91	0,80	0,95

Os resultados mostraram que a fissura de ruptura no primeiro dente surgiu em valores de carga de cerca de 76% a 94% da carga de ruptura da junta, enquanto a fissura de ruptura do segundo dente com cerca de 80% a 99% e a fissura de ruptura do terceiro dente com cerca de 87% a 95% da carga máxima de ruptura.

A Figura 119 mostra a influência da tensão de confinamento na relação entre $\tau_{nfr,1}$ e τ_{un} das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

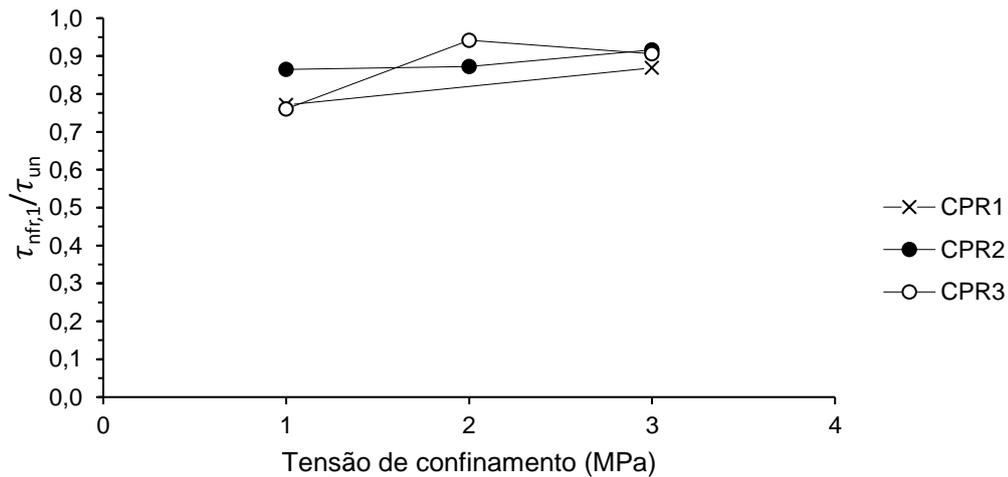


Figura 119 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura de ruptura no primeiro dente e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

A Figura 120 mostra a influência da tensão de confinamento na relação entre $\tau_{nfr,2}$ e τ_{un} das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

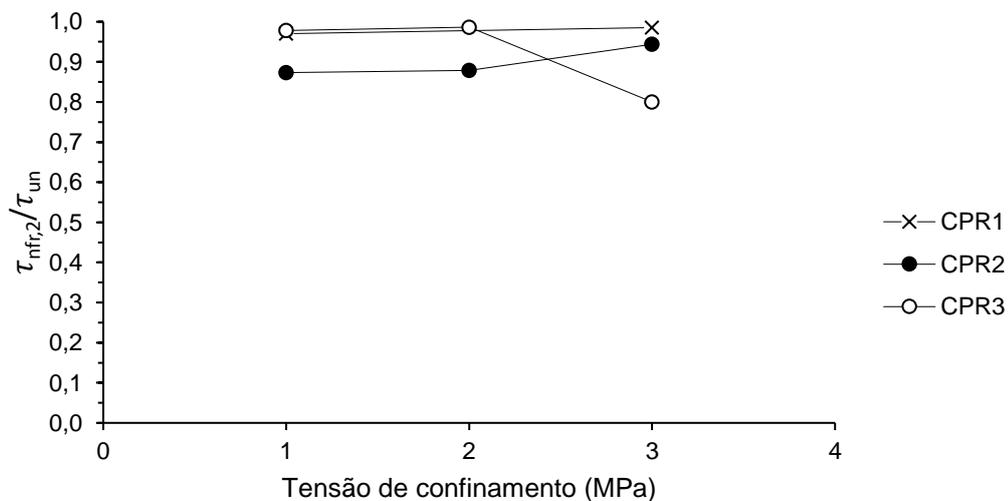


Figura 120 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura de ruptura no segundo dente e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

A Figura 121 mostra a influência da tensão de confinamento na relação entre $\tau_{nfr,3}$ e τ_{un} das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

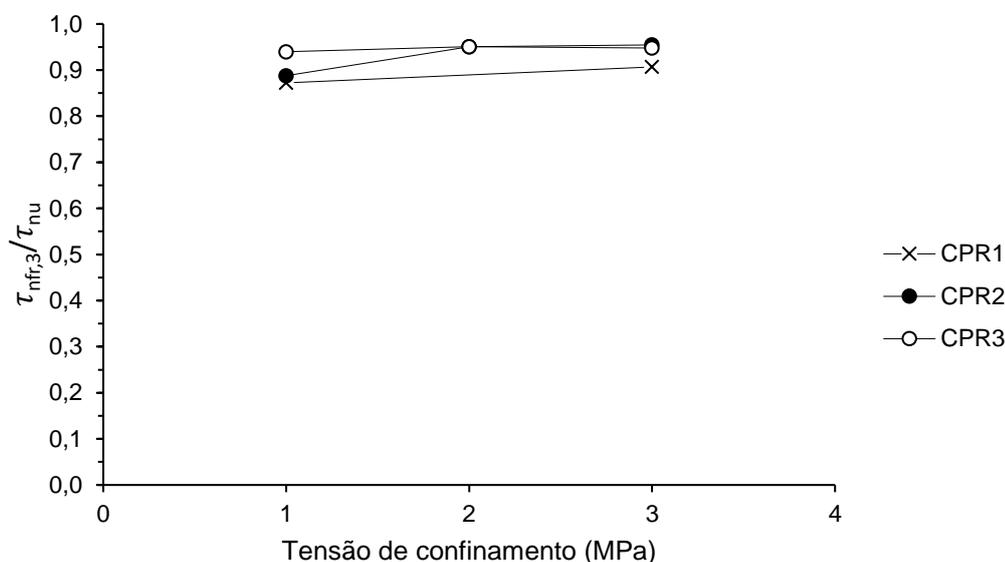


Figura 121 - Influência da tensão de confinamento na relação entre a tensão de cisalhamento normalizada no surgimento da fissura de ruptura no terceiro dente e a tensão de cisalhamento normalizada máxima das juntas secas com três dentes de cisalhamento.

Percebe-se que os corpos-de-prova número dois, referentes ao grupo 3 ($f_{cm} = 46,59$ MPa) apresentaram tendência de aumento da relação entre a carga de surgimento das fissuras de ruptura nos dentes de cisalhamento com a carga máxima quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa, e quando aumentou de 3 MPa para 2 MPa. Os corpos-de-prova número 3, referentes ao grupo 2 ($f_{cm} = 43,06$ MPa) apresentaram aumento da relação quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa, porém diminuição da relação quando aumentou de 2 MPa para 3 MPa. Os corpos-de-prova número 1, referentes ao grupo 1 ($f_{cm} = 34,90$ MPa) apresentaram aumento da relação quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 3 MPa. Novamente, não é observada uma influência da tensão de confinamento na carga de surgimento das fissuras.

As Figuras 122 a 129 mostram a cinética da abertura das fissuras de ruptura dos dentes de cisalhamento dos corpos-de-prova de junta seca com três dentes de cisalhamento.

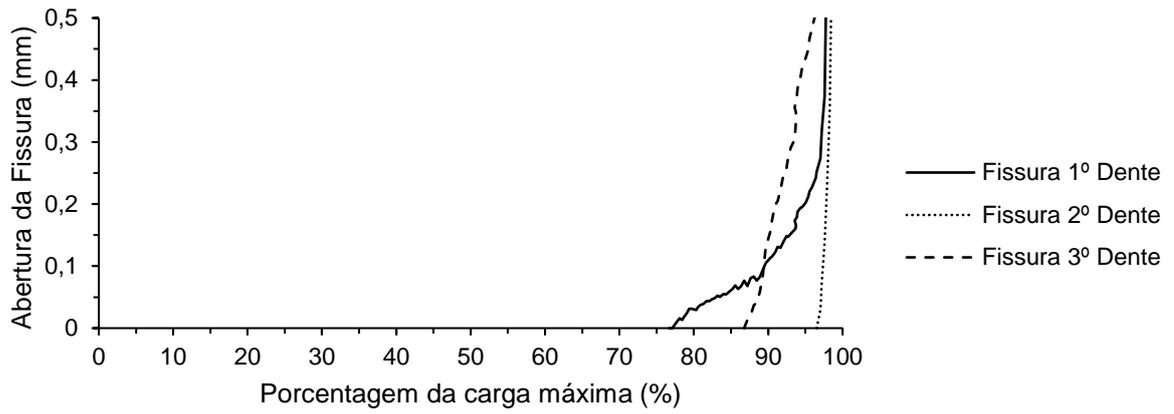


Figura 122 – Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR1-3-1,0 de junta seca.

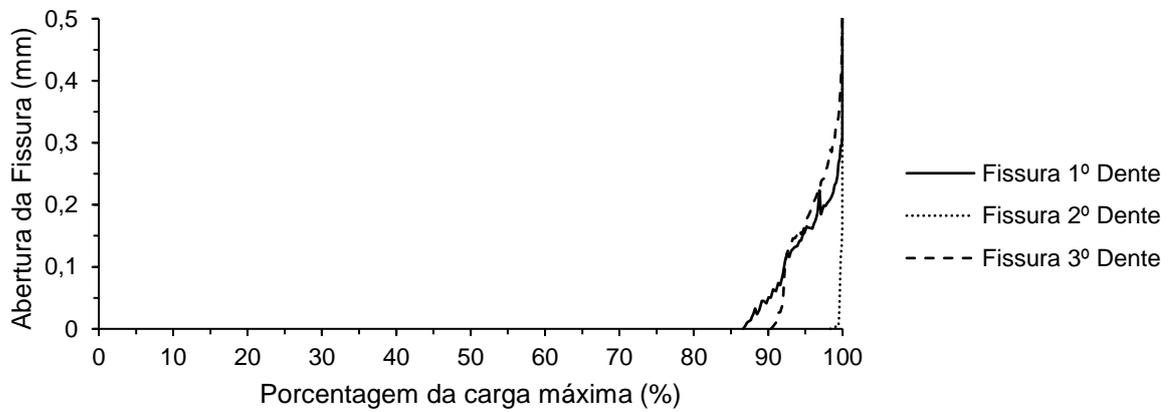


Figura 123 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR1-3-3,0 de junta seca.

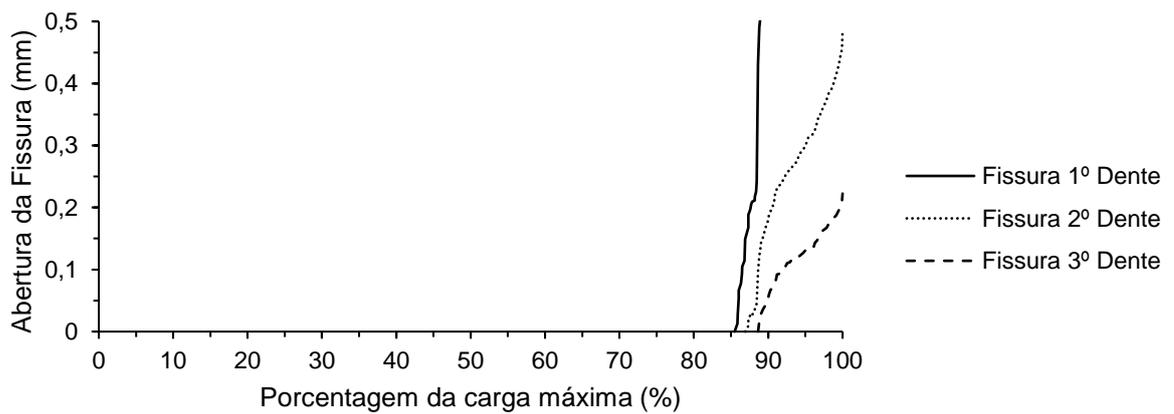


Figura 124 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR2-3-1,0 de junta seca.

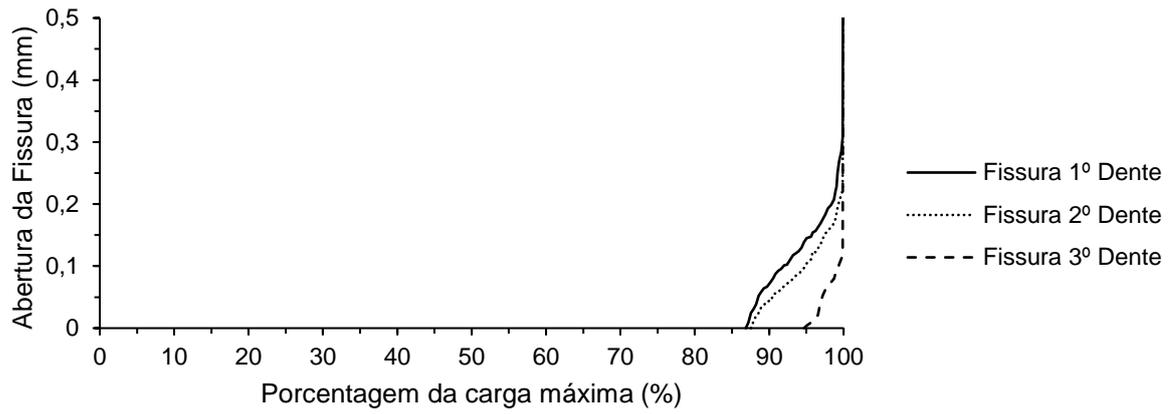


Figura 125 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR2-3-2,0 de junta seca.

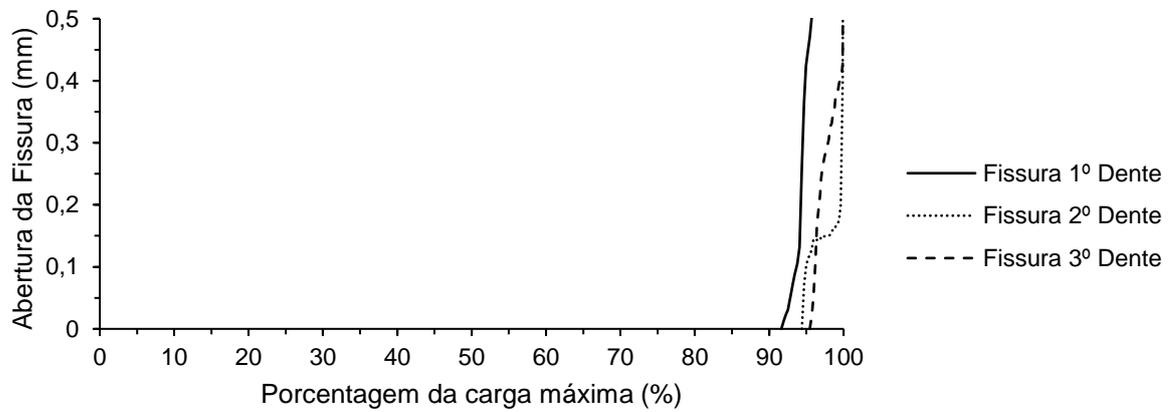


Figura 126 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR2-3-3,0 de junta seca.

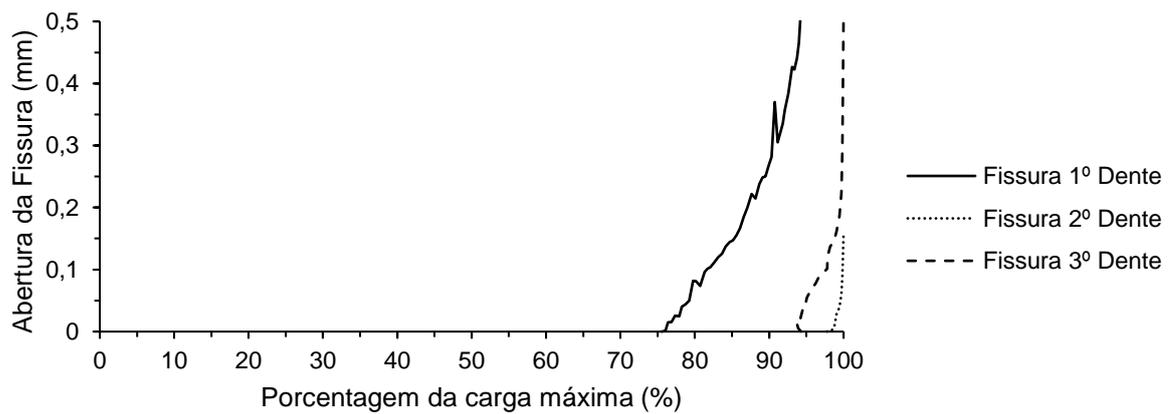


Figura 127 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR3-3-1,0 de junta seca.

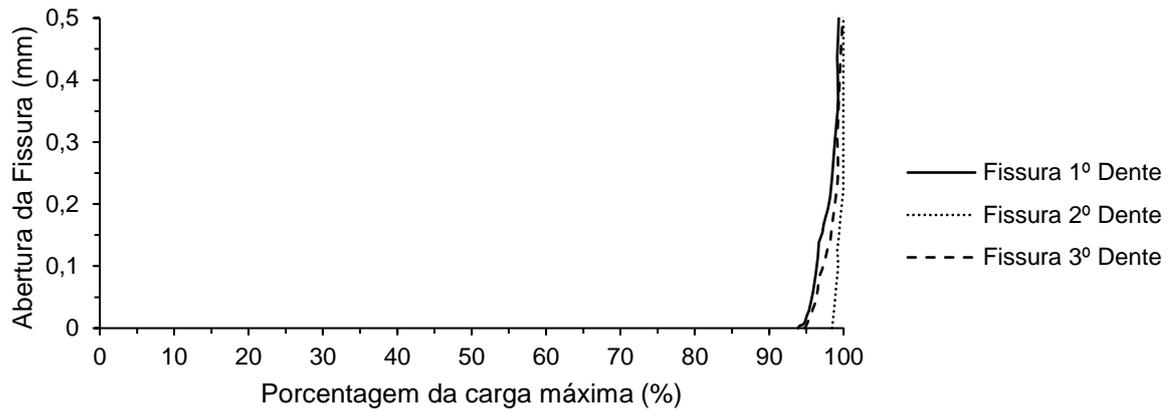


Figura 128 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR3-3-2,0 de junta seca.

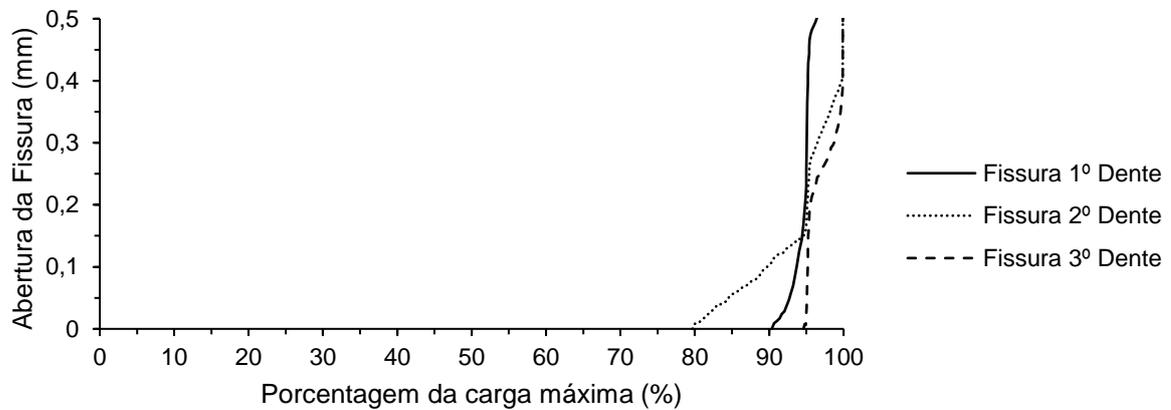


Figura 129 - Cinética de abertura das fissuras de ruptura no primeiro, segundo e terceiro dente do corpo-de-prova CPR3-3-3,0 de junta seca.

Os resultados mostraram que o aumento da tensão de confinamento tendeu a acentuar a cinética de abertura das fissuras, exceto para o corpo-de-prova CP3-3-3,0 onde sua ruptura ocorreu de forma brusca.

4.4.4. Comparação entre as juntas secas com um e três dentes

A Figura 130 mostra as curvas de tensão de cisalhamento normalizada *versus* deslizamento dos ensaios das juntas secas com um e três dentes submetidas a diferentes tensões confinantes. Cada curva representa a média de três corpos-de-prova.

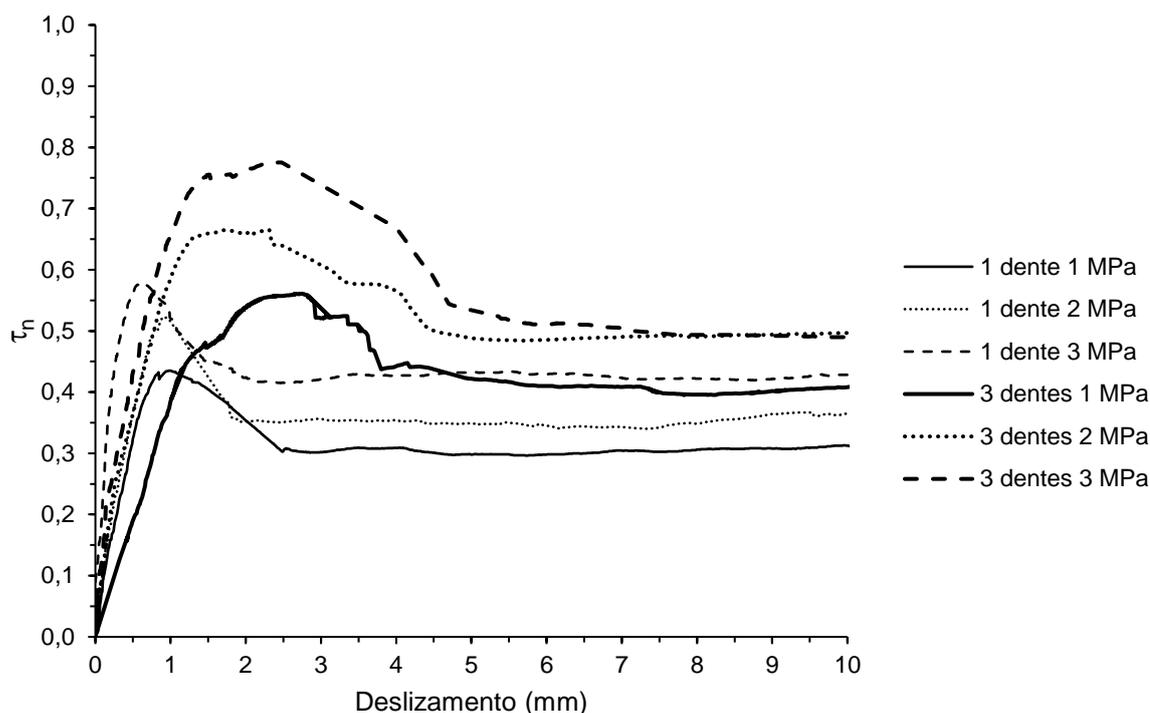


Figura 130 – Curvas de tensão de cisalhamento máxima normalizada *versus* deslizamento dos ensaios *push-off* das juntas secas com um dente e três dentes para as diferentes tensões de confinamento.

Como era de se esperar, os resultados mostraram que as juntas com três dentes apresentaram resistência superior às das juntas com um dente. A presença maior de dentes de cisalhamento proporciona maiores áreas monolíticas na junta, além do aumento do plano de cisalhamento. Como prevê a teoria do atrito-cisalhamento, a parte monolítica da junta é responsável por duas parcelas de resistência ao cisalhamento: coesão e atrito, enquanto que a parte lisa possui apenas o atrito.

Os corpos-de-prova foram projetados com o intuito de apresentarem a mesma quantidade de área lisa e que o aumento da parte monolítica fosse proporcional ao aumento da quantidade de dentes. Observa-se que o aumento da resistência da junta não segue uma tendência proporcional conforme o aumento dos dentes, ou seja, o triplo da quantidade de dentes não proporciona o triplo da resistência da junta de um dente.

A Figura 131 mostra a influência da tensão de confinamento sobre a tensão de cisalhamento máxima normalizada das juntas secas com um e três dentes de cisalhamento.

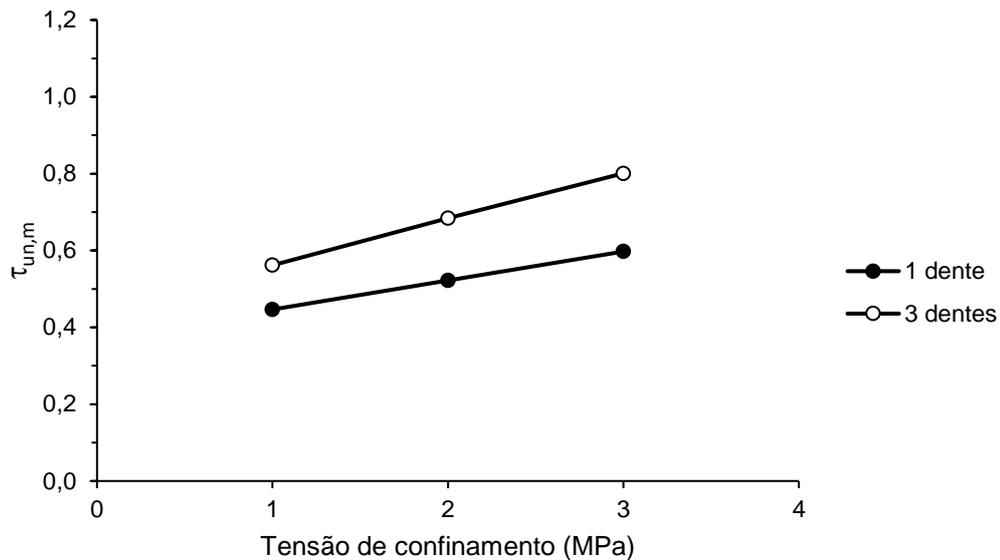


Figura 131 - Influência da tensão de confinamento na tensão de cisalhamento máxima normalizada para juntas secas com um e três dentes de cisalhamento.

Os resultados mostraram que nas juntas secas com três dentes de cisalhamento o aumento da tensão de confinamento máxima normalizada foi mais efetivo com relação ao ganho de resistência. O ganho de resistência das juntas com três dentes foi 37,76% superior ao das juntas com um dente quando a tensão de confinamento aumentou de 1 MPa para 2 MPa, 28,57% quando aumentou de 1 MPa para 3 MPa e 14,71% quando aumentou de 2 MPa para 3 MPa. Esses resultados estão ilustrados na Tabela 41.

Tabela 41 - Percentual do aumento da tensão de cisalhamento máxima normalizada devido ao aumento da tensão de confinamento nos corpos-de-prova de juntas secas com um e três dentes de cisalhamento.

Quantidade de dentes	Acréscimo de tensão de cisalhamento máxima normalizada (%)		
	1 → 2	1 → 3	2 → 3
1	15,56	33,33	15,38
3	21,43	42,86	17,65
1 → 3	37,76	28,57	14,71

O ganho de resistência devido ao aumento do número de dentes, mostrou que foi proporcional ao aumento da tensão de confinamento. Quando houve o aumento do número de dentes de um para três, as juntas secas apresentaram 24,44% de aumento de resistência quando submetidas a tensão confinante de 1 MPa, 30,77% quando submetidas a 2 MPa e 33,33% quando submetidas a 3 MPa. Esses resultados estão ilustrados na Tabela 42.

Tabela 42 - Percentual do aumento da tensão de cisalhamento máxima normalizada devido ao aumento de um para três dentes de cisalhamento nos corpos-de-prova de juntas secas.

Tensão de confinamento (MPa)	Acréscimo de tensão de cisalhamento última normalizada (%)
	1 → 3
1	24,44
2	30,77
3	33,33

4.4.5. Comparação dos resultados experimentais com normas e equações propostas por pesquisadores

A Figura 132 mostra a tensão de cisalhamento máxima normalizada obtida experimentalmente da média dos corpos-de-prova de um dente e as obtidas pela Equação (8 prevista pela AASHTO (1999)).

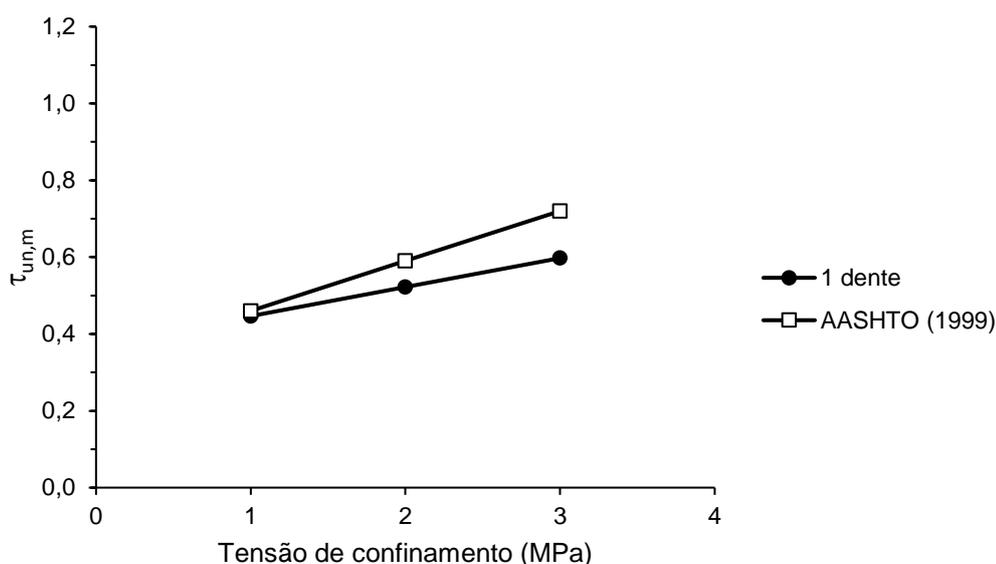


Figura 132 - Tensão de cisalhamento última normalizada obtida experimentalmente da média dos resultados experimentais das juntas secas com um dente e os previstos pela AASHTO (1999).

Observa-se que a Equação (8 prescrita pela AASHTO (1999) mostrou ser adequada para a previsão da resistência da junta seca de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento submetida a tensão de confinamento de 1 MPa. Porém, conforme o aumento da tensão confinante, os resultados mostram aumento de divergência. Para 1 MPa, a diferença da estimativa da equação da AASHTO (1999) com o resultado experimental foi de 2,22%, para 2

MPa foi 13,46% e para 3 MPa foi 20%. Esses resultados estão apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 - Diferença entre os valores previstos pela equação da AASHTO (1999) para a tensão de cisalhamento máxima normalizada das juntas secas com um dente de cisalhamento.

Tensão de confinamento (MPa)	$\tau_{un,m}^{AASHTO}$	$\tau_{un,m}$	Diferença (%)
1	0,46	0,45	2,22
2	0,59	0,52	13,46
3	0,72	0,60	20,00

Onde: Diferença = $(\tau_{un,m}^{AASHTO} - \tau_{un,m}) / (\tau_{un,m}^{AASHTO}) * 100$

A Figura 133 mostra a tensão de cisalhamento máxima normalizada obtida experimentalmente da média dos corpos-de-prova de três dentes e as obtidas pela Equação (8 prevista pela AASHTO (1999)).

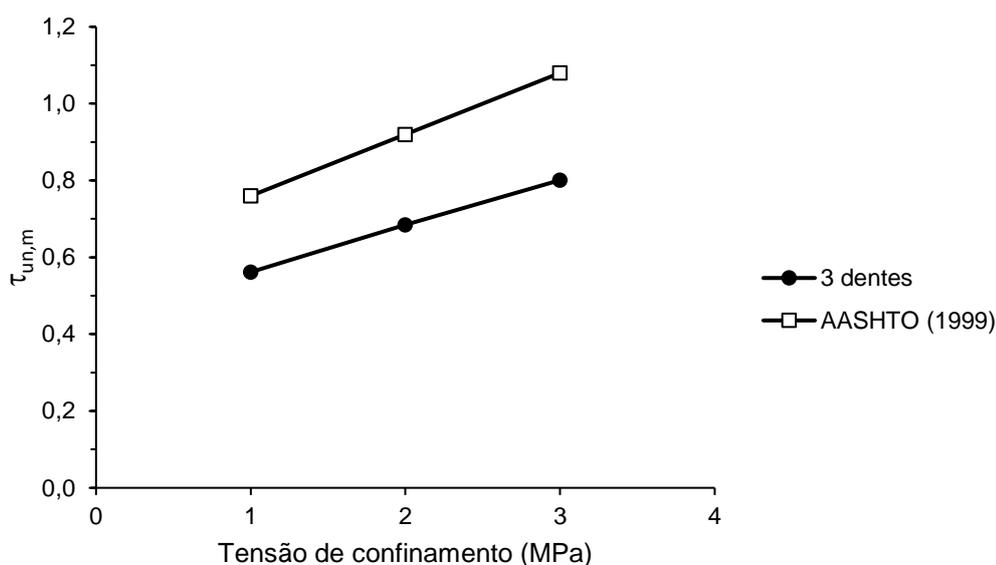


Figura 133 - Tensão de cisalhamento última normalizada obtida experimentalmente da média dos resultados experimentais das juntas secas com três dentes e os previstos pela AASHTO (1999).

Para as juntas secas com três dentes os resultados experimentais apresentaram elevada diferença com os previstos pela equação normativa da AASHTO (1999). A diferença da estimativa da equação da AASHTO (1999) com relação aos resultados experimentais da média dos corpos-de-prova para a tensão de confinamento de 1 MPa foi de 35,71%, para 2 MPa foi 35,29% e para 3 MPa foi 35%. Esses resultados estão ilustrados na Tabela 44.

Tabela 44 - Percentual de diferença entre os valores previstos pela equação da AASHTO (1999) para a resistência das juntas secas com três dentes de cisalhamento em termos de tensão de cisalhamento normalizada.

Tensão de confinamento (MPa)	$\tau_{un,m} AASHTO$	$\tau_{un,m}$	Diferença (%)
1	0,76	0,56	35,71
2	0,92	0,68	35,29
3	1,08	0,80	35,00

Onde: $Diferença = (\tau_{un,m} AASHTO - \tau_{un,m}) / (\tau_{un,m} AASHTO) * 100$

Essa diferença notável na estimativa da equação da AASHTO (1999) para as juntas secas com três dentes pode ser explicada pelo fato de que a equação normativa foi formulada com base na teoria para juntas com um dente de cisalhamento, sendo assim, ela prevê valores não condizentes com a realidade de juntas secas com múltiplos dentes.

A Figura 134 apresenta uma comparação dos resultados experimentais desta pesquisa para juntas secas com um dente de cisalhamento com os resultados experimentais de outros autores.

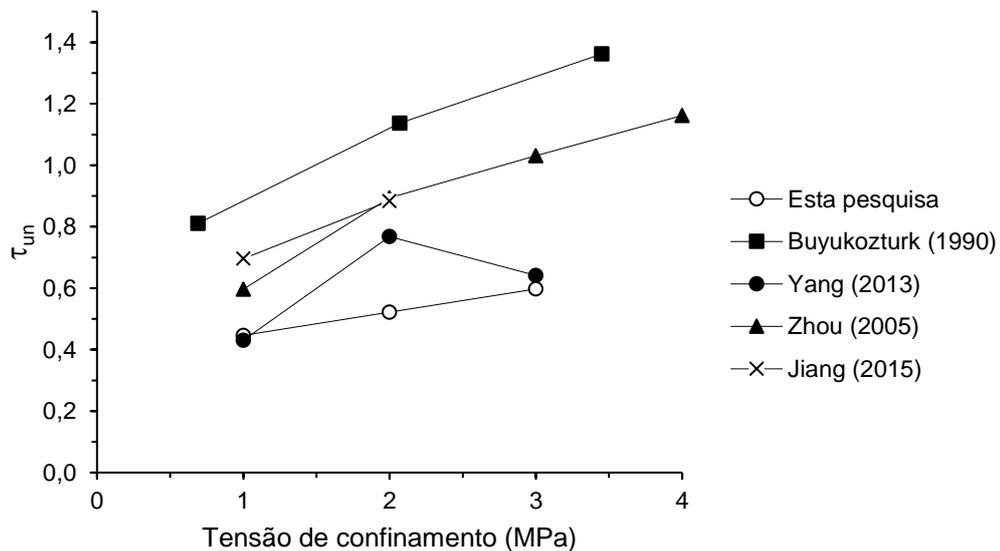


Figura 134 - Tensão de cisalhamento máxima normalizada obtida experimentalmente da média das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente e os resultados de outros autores.

Os resultados mostraram que as juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento apresentaram os menores valores de tensão de cisalhamento máxima normalizada. Isso explica como o concreto

fabricado com agregados reciclados é caracterizado por ser um concreto menos resistente ao cisalhamento comparado ao concreto convencional.

A Figura 135 apresenta uma comparação dos resultados experimentais desta pesquisa para juntas secas com três dentes de cisalhamento com os resultados experimentais de outros autores.

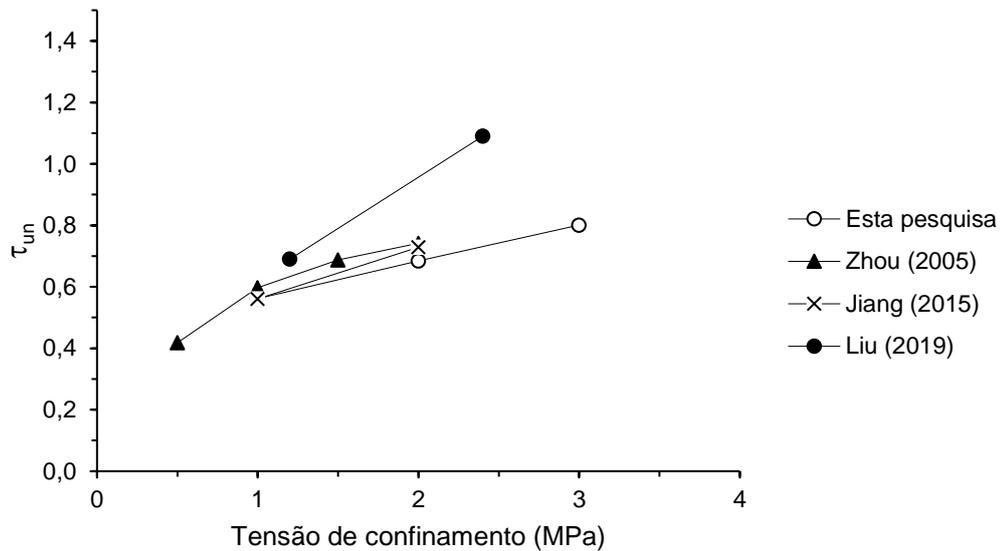


Figura 135 - Tensão de cisalhamento máxima normalizada obtida experimentalmente da média das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes e os resultados de outros autores.

Os resultados mostraram que as juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento apresentaram, novamente, os menores valores de tensão de cisalhamento máxima normalizada. Isso condiz com o fato do concreto fabricado com agregado graúdo reciclado ser menos resistente a esforços de cisalhamento que o convencional.

As Tabelas 45, 46 e 47 mostram os resultados experimentais desta pesquisa e os previstos pelas equações da literatura para as juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento.

Tabela 45 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_c = 34,90$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

Juntas secas com 1 dente de cisalhamento			
Resistência à compressão do concreto f_c (MPa)	34,90		
Tensão de confinamento σ_n (MPa)	1	2	3
AASHTO (1999)	82,94	107,04	131,14
ATEP (1996)	93,25	127,45	161,65
ACI-318 (2019)	60,00	120,00	180,00
EUROCODE 2 (2004)	60,64	87,64	114,64
BUYUKOZTURK (1990)	155,47	196,27	237,07
ROMBACH (2002)	68,36	87,86	107,36
TURMO (2006)	54,72	74,19	93,67
ALCADE (2013)	121,53	176,44	231,35
Esta pesquisa (* erro no ensaio do corpo-de-prova)	80,15	*	110,01

Tabela 46 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_c = 43,06$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

Juntas secas com 1 dente de cisalhamento			
Resistência à compressão do concreto f_c (MPa)	43,06		
Tensão de confinamento σ_n (MPa)	1	2	3
AASHTO (1999)	90,80	116,24	141,68
ATEP (1996)	107,06	141,26	175,46
ACI-318 (2019)	60,00	120,00	180,00
EUROCODE 2 (2004)	65,70	92,70	119,70
BUYUKOZTURK (1990)	168,17	208,97	249,77
ROMBACH (2002)	79,78	99,28	118,78
TURMO (2006)	61,14	81,74	102,34
ALCADE (2013)	121,53	176,44	231,35
Esta pesquisa	81,95	101,06	117,23

Tabela 47 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_c = 46,59$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

Juntas secas com 1 dente de cisalhamento			
Resistência à compressão do concreto f_c (MPa)	46,59		
Tensão de confinamento σ_n (MPa)	1	2	3
AASHTO (1999)	93,97	119,95	145,93
ATEP (1996)	113,03	147,23	181,43
ACI-318 (2019)	60,00	120,00	180,00
EUROCODE 2 (2004)	67,79	94,79	121,79
BUYUKOZTURK (1990)	173,29	214,09	254,89
ROMBACH (2002)	84,73	104,23	123,73
TURMO (2006)	63,79	84,85	105,92
ALCADE (2013)	121,53	176,44	231,35
Esta pesquisa	96,45	108,71	117,94

As Tabelas 48, 49 e 50 mostram os resultados experimentais desta pesquisa e os previstos pelas equações da literatura para as juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento.

Tabela 48 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_c = 34,90$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

Juntas secas com 3 dentes de cisalhamento			
Resistência à compressão do concreto f_c (MPa)	34,90		
Tensão de confinamento σ_n (MPa)	1	2	3
AASHTO (1999)	224,83	273,13	321,43
ATEP (1996)	155,42	212,42	269,42
ACI-318 (2019)	100,00	200,00	300,00
EUROCODE 2 (2004)	101,07	146,07	191,07
BUYUKOZTURK (1990)	259,11	327,11	395,11
ROMBACH (2002)	179,08	211,58	244,08
TURMO (2006)	140,15	174,58	209,01
ALCADE (2013)	239,82	307,10	374,39
Esta pesquisa (* erro no ensaio do corpo-de-prova)	173,64	*	260,83

Tabela 49 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_c = 43,06$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

Juntas secas com 3 dentes de cisalhamento			
Resistência à compressão do concreto f_c (MPa)	43,06		
Tensão de confinamento σ_n (MPa)	1	2	3
AASHTO (1999)	248,41	300,73	353,04
ATEP (1996)	178,43	235,43	292,43
ACI-318 (2019)	100,00	200,00	300,00
EUROCODE 2 (2004)	109,50	154,50	199,50
BUYUKOZTURK (1990)	280,28	348,28	416,28
ROMBACH (2002)	213,35	245,85	278,35
TURMO (2006)	159,42	197,22	235,02
ALCADE (2013)	239,82	307,10	374,39
Esta pesquisa	193,59	222,64	266,80

Tabela 50 - Resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_c = 46,59$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

Juntas secas com 3 dentes de cisalhamento			
Resistência à compressão do concreto f_c (MPa)	46,59		
Tensão de confinamento σ_n (MPa)	1	2	3
AASHTO (1999)	257,91	311,85	365,78
ATEP (1996)	188,38	245,38	302,38
ACI-318 (2019)	100,00	200,00	300,00
EUROCODE 2 (2004)	112,98	157,98	202,98
BUYUKOZTURK (1990)	288,81	356,81	424,81
ROMBACH (2002)	228,18	260,68	293,18
TURMO (2006)	167,37	206,56	245,75
ALCADE (2013)	239,82	307,10	374,39
Esta pesquisa	173,82	235,14	242,16

As Figuras 136, 137 e 138 comparam graficamente os resultados experimentais desta pesquisa e os previstos pelas equações da literatura para as juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento.

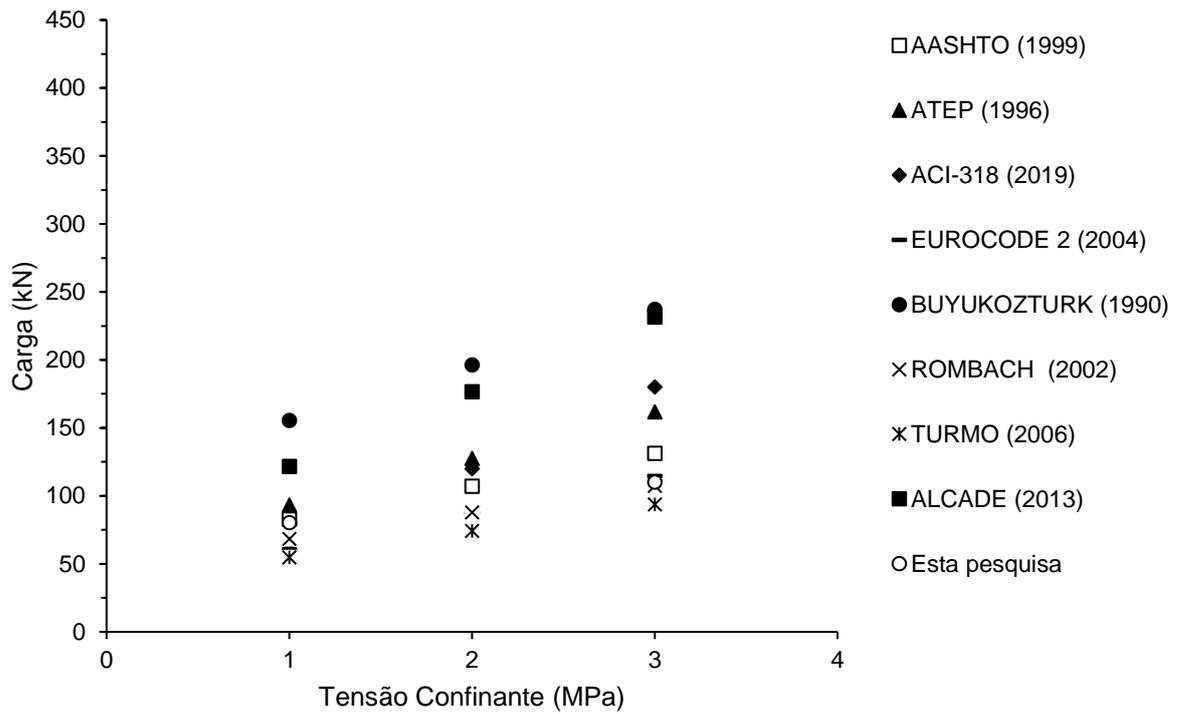


Figura 136 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_c = 34,90$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

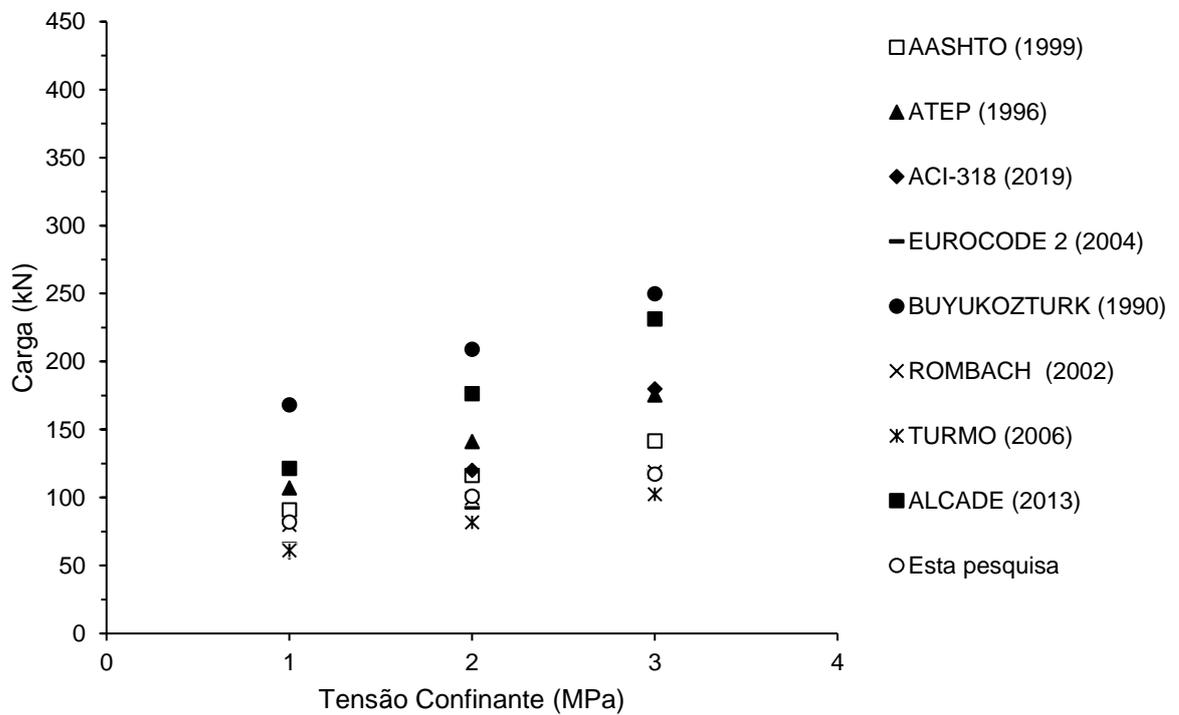


Figura 137 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_c = 43,06$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

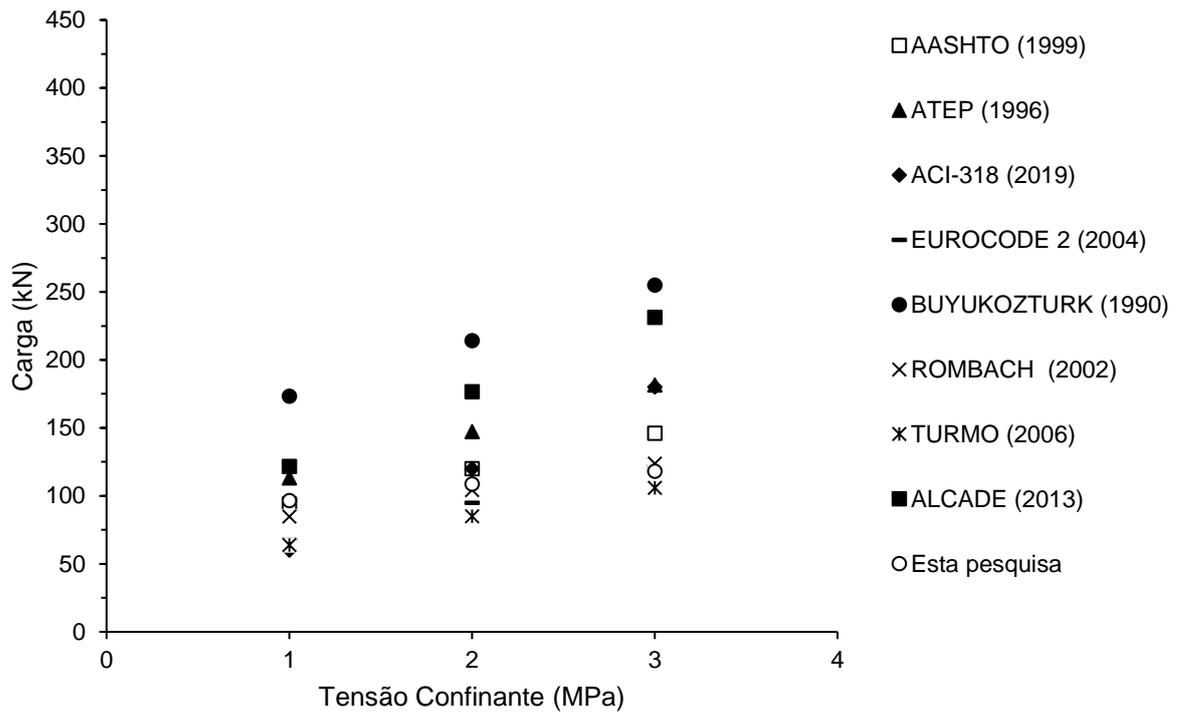


Figura 138 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_c = 46,59$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

As Figuras 139, 140 e 141 comparam graficamente os resultados experimentais desta pesquisa e os previstos pelas equações da literatura para as juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento.

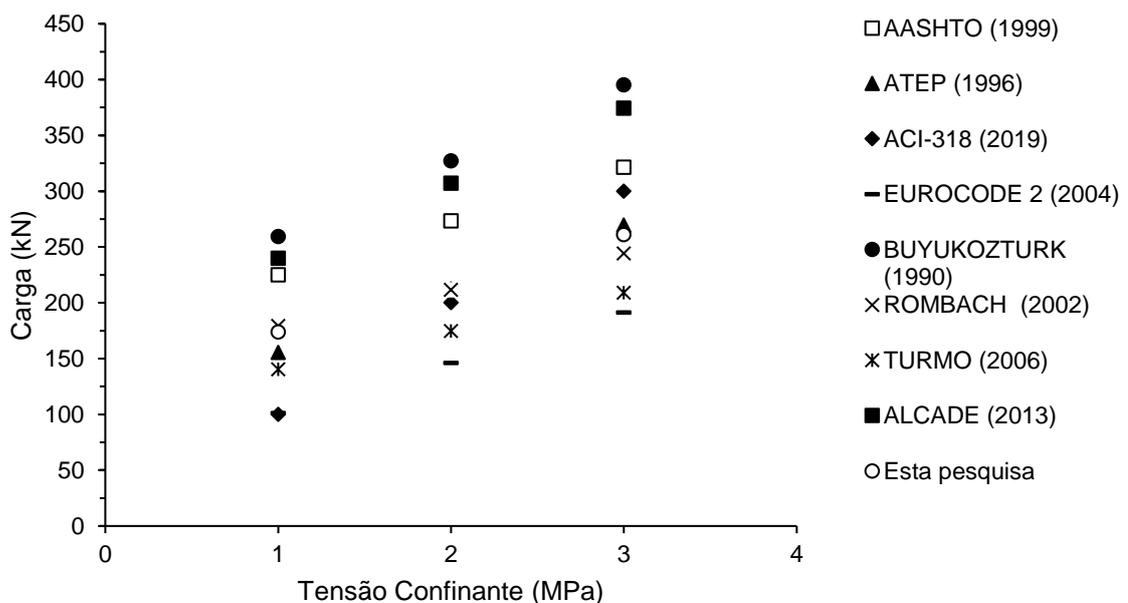


Figura 139 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 1 ($f_c = 34,90$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

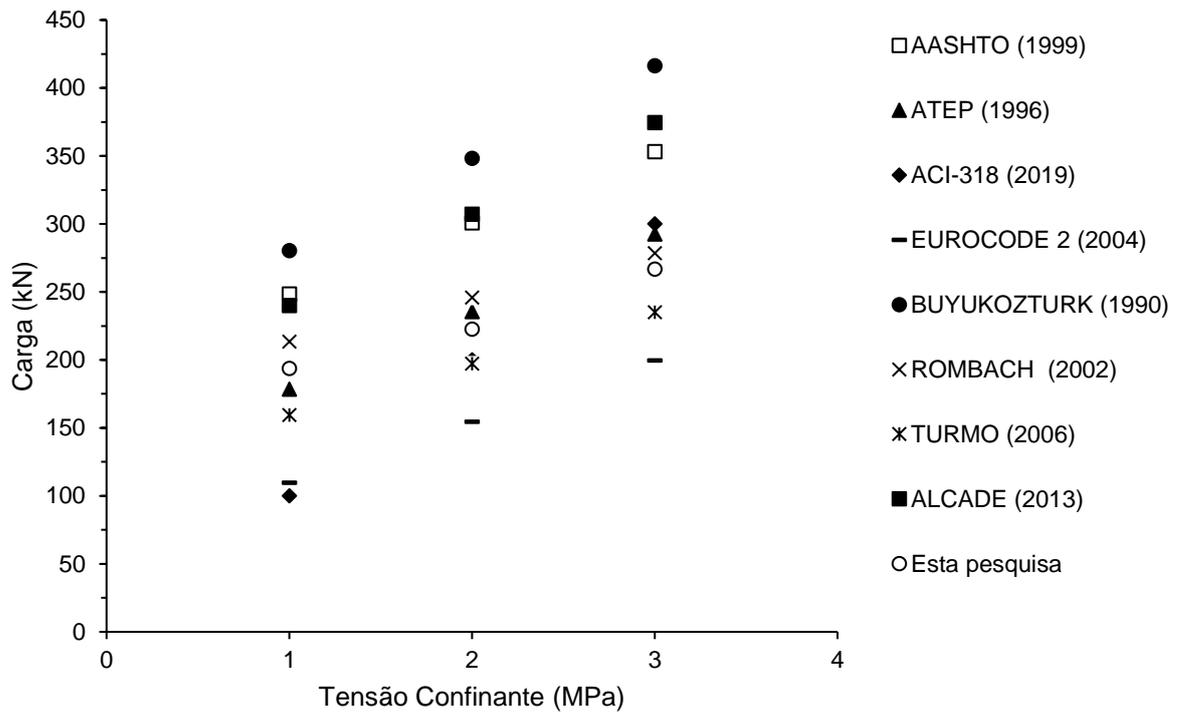


Figura 140 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 2 ($f_c = 43,06$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

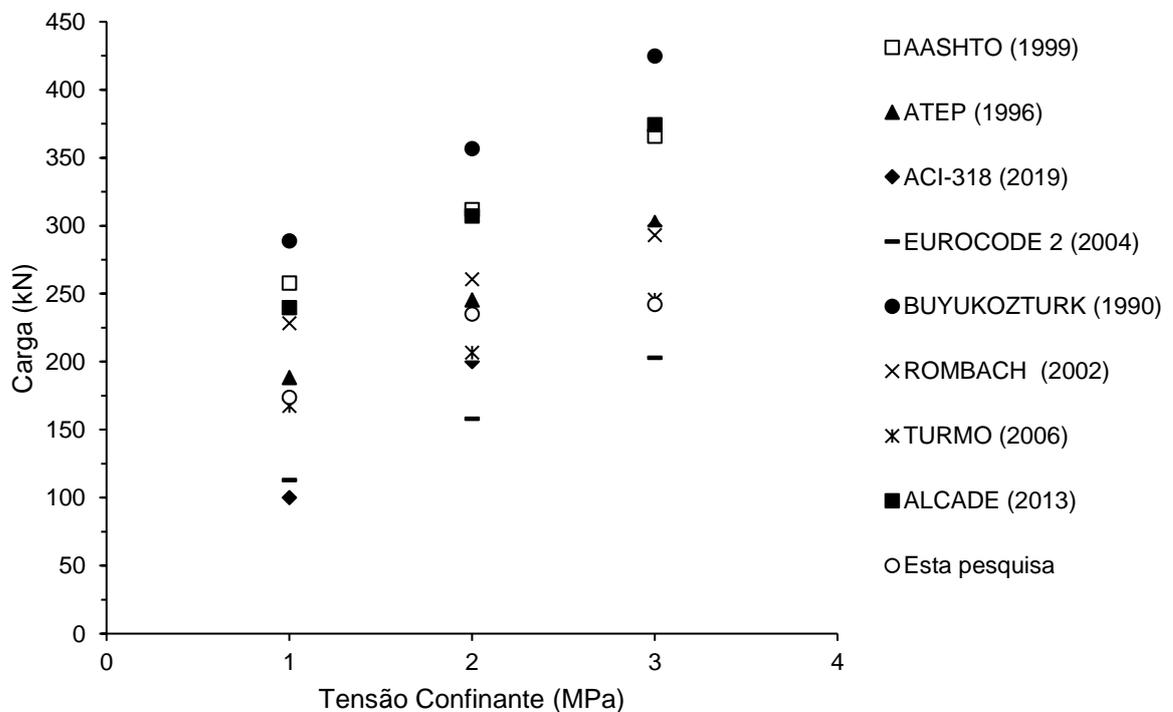


Figura 141 - Comparação gráfica entre os resultados experimentais dos corpos-de-prova do grupo 3 ($f_c = 46,59$ MPa) de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e os previstos pelas equações da literatura.

Percebe-se que algumas equações da literatura são adequadas para previsão da resistência das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados, enquanto outras preveem valores não condizentes. Para uma melhor visualização, a Tabela 51 e a Tabela 52 mostram a média das relações entre a carga experimental das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados e a prevista pelas equações da literatura para cada tensão confinante.

Tabela 51 - Média dos valores da relação entre a carga experimental das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento e a carga prevista pelas equações da literatura para cada tensão confinante.

Juntas secas com 1 dente de cisalhamento			
Tensão de confinamento σ_n (MPa)	1	2	3
AASHTO (1999)	0,97	0,89	0,82
ATEP (1996)	0,83	0,73	0,67
ACI-318 (2019)	1,44	0,87	0,64
EUROCODE 2 (2004)	1,33	1,12	0,97
BUYUKOZTURK (1990)	0,52	0,50	0,47
ROMBACH (2002)	1,11	1,03	0,99
TURMO (2006)	1,44	1,26	1,14
ALCADE (2013)	0,71	0,59	0,50

Tabela 52 - Média dos valores da relação entre a carga experimental das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento e a carga prevista pelas equações da literatura para cada tensão confinante.

Juntas secas com 3 dentes de cisalhamento			
Tensão de confinamento σ_n (MPa)	1	2	3
AASHTO (1999)	0,74	0,75	0,74
ATEP (1996)	1,04	0,95	0,89
ACI-318 (2019)	1,80	1,14	0,86
EUROCODE 2 (2004)	1,67	1,46	1,30
BUYUKOZTURK (1990)	0,65	0,65	0,62
ROMBACH (2002)	0,88	0,90	0,95
TURMO (2006)	1,16	1,13	1,12
ALCADE (2013)	0,75	0,75	0,69

Os resultados mostraram que para a previsão da resistência das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento as equações de TURMO (2006), EUROCODE 2 (2004) e ROMBACH (2002) se demonstraram condizentes com os resultados experimentais. A equação de TURMO

(2006) apresentou margem de segurança de cerca de 30,33% para tensão de confinamento de 1 MPa, 20,53% para 2 MPa e 12,58% para 3 MPa. A equação do EUROCODE 2 (2004) apresentou margem de segurança de cerca de 24,63% para tensão de confinamento de 1 MPa, 10,54% para 2 MPa e para 3 MPa a equação previu um valor cerca de 3,19% acima do experimental. A equação de ROMBACH (2002) apresentou margem de segurança de cerca de 9,84% para tensão de confinamento de 1 MPa, 2,94% para 2 MPa e para 3 MPa a equação previu um valor cerca de 1,27% acima do experimental. A equação menos condizente com os resultados experimentais foi a de BUYUZOTURK (1990) apresentando previsões com valores 92,95% acima dos resultados experimentais para tensão de confinamento de 1 MPa, 101,86% para 2 MPa e 114,89% para 3 MPa.

Para as juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com três dentes de cisalhamento as equações de TURMO (2006) e EUROCODE 2 (2004) foram as que apresentaram previsões condizentes com os resultados experimentais. A equação de TURMO (2006) apresentou margem de segurança de cerca de 13,55% para tensão de confinamento de 1 MPa, 11,78% para 2 MPa e 10,10% para 3 MPa. A equação do EUROCODE 2 (2004) apresentou margem de segurança de cerca de 40,08% para tensão de confinamento de 1 MPa, 31,71% para 2 MPa e 22,72% para 3 MPa. A equação menos condizente com os resultados experimentais foi, novamente, a de BUYUZOTURK (1990) apresentando previsões com valores 53,39% acima dos resultados experimentais para tensão de confinamento de 1 MPa, 54,09% para 2 MPa e 60,98% para 3 MPa.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a resistência mecânica ao cisalhamento de juntas secas de pontes segmentadas protendidas produzidas com concreto de agregados graúdos reciclados. Com base nos resultados experimentais desta pesquisa, pode-se concluir que:

- o agregado graúdo reciclado mostrou ser um material com propriedades diferentes do agregado convencional. O mesmo apresentou massa específica menor, abrasão e porosidade maiores quando comparado com o agregado graúdo convencional, além de maiores teores de absorção de água. Isso tudo

devido à presença de argamassa aderida, que representou cerca de 40% do grão;

- o concreto com agregados graúdos reciclados apresentou valores de absorção de água e porosidade elevados, com isso, a densidade e o módulo de elasticidade apresentaram valores reduzidos. Isso ocorreu, pois, o agregado graúdo é o principal responsável pelas propriedades do concreto com ele confeccionado;
- por meio os ensaios de ruptura *push-off* das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados lisas foi possível a obtenção dos coeficientes de atrito do concreto com agregados graúdos reciclados, que no geral demonstraram valores similares aos obtidos para agregados convencionais;
- os ensaios de ruptura *push-off* das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um e três dentes de cisalhamento apresentaram comportamento semelhante às de concreto convencional. As curvas Carga *versus* Deslizamento mostraram um comportamento similar às obtidas por outros pesquisadores para concreto convencional;
- o comportamento na ruptura das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados foi semelhante às de concreto convencional. Observou-se que em torno de 60% a 80% da carga de ruptura da junta, uma fissura inclinada a um ângulo de aproximadamente 45 graus surgiu na base dos dentes. Com o incremento da carga, mais fissuras surgiram ao longo do plano de cisalhamento, até certo instante onde todas elas se uniram e ocorreu então o corte do dente. Esse tipo de ruptura é conhecido como *shear-off*;
- a tensão de confinamento teve um papel fundamental na resistência das junta secas de concreto com agregados graúdos reciclados. O seu aumento proporcionou ganhos de resistência e rigidez, sendo possível afirmar que seu aumento contribuiu de forma positiva para a resistência das juntas.
- o número de dentes foi outro aspecto de elevada importância para a resistência das juntas. Seu aumento proporcionou ganhos de resistência e ductilidade, porém, diferente do que ocorre nas juntas de concreto convencional, o aumento do número de dentes demonstrou ser mais efetivo nas de concreto com agregados graúdos reciclados, caracterizando ser um comportamento característico para esse material;

- quando comparado os resultados obtidos nesta pesquisa com outros da literatura, as juntas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente e três dentes apresentaram os menores valores de tensão de cisalhamento normalizada, indicando menor resistência ao cisalhamento deste tipo de concreto;
- apenas certas equações da literatura demonstraram ser efetivas para a previsão da resistência de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados. A equação normativa da AASHTO (1999) apresentou ser efetiva para prever a resistência das juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento para tensão confinante de 1 MPa, porém, sua efetividade diminuiu conforme o aumento da tensão confinante. Para as juntas secas com três dentes de cisalhamento a AASHTO (1999) previu valores não condizentes com os resultados experimentais. As equações mais apropriadas para a previsão da resistência de juntas secas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente de cisalhamento demonstraram ser as de TURMO (2006), EUROCODE 2 (2004) e ROMBACH (2002), enquanto que para as de três dentes foram as de TURMO (2006) e EUROCODE 2 (2004);
- Para fins práticos, tomando como base a maior discrepância nos resultados, recomenda-se, para tensões de confinamento de até 3 MPa, um coeficiente de correção de 0,8 para a equação da AASHTO (1999) para juntas de concreto com agregados graúdos reciclados com um dente e 0,7 para juntas com três dentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. **Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges**, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NRMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 5739 Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NRMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NRMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 7222 Concreto e**

argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 8522 Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica**, Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR NM 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica**, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR NM 45 Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR NM 52 Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR NM 53 Agregado graúdo – Determinação de massa específica , massa específica aparente e absorção de água**, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 318. **Building Code Requirements Available for Public Review (ACI 318-19)**. 2019.

ALCALDE, M.; CIFUENTES, H.; MEDINA, F. Influencia del número de llaves en la resistencia a cortante de juntas secas postensadas. **Materiales de Construcción**, v. 63, n. 310, p. 297–307, 2013.

ALI, M. A.; WHITE, R. N. Enhanced contact model for shear friction of normal and high-strength concrete. **ACI Structural Journal**, v. 96, n. 3, p. 348–360, 1999.

ARAÚJO, R. C. C. DE. **Avaliação experimental de concretos sustentáveis**

utilizando RCD como agregado graúdo, resíduo de mármore como agregado miúdo e com adição de fibra sintética. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

ASOCIACIÓN TÉCNICA ESPAÑOLA DE PRETENSADO, ATEP. Proyecto y construcción de puentes y estructuras con pretensado exterior, 1996.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BIRKELAND, P. W.; BIRKELAND, H. W. Connections in precast concrete construction. **Journal of American Concrete Institute**, v. 63, n. 3, p. 345–368, 1966.

BUYUKOZTURK, O.; BAKHOUM, M. M.; BEATTIE, S. M. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges. **Journal of Structural Engineering**, v. 116, n. 12, p. 3380–3401, 1990.

EUROPÄISCHE NORM, EN 1097-1:2011. **Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos**, 2011.

EUROCODE 2. **Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings**, 2004.

FALESCHINI, F.; ZANINI, M. A.; PELLEGRINO, C. Environmental impacts of recycled aggregate concrete. **Researchgate**, n. December, p. 1–9, 2016.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA (2013). **Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual**. U.S. Department of Transportation, 2013.

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos.** Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto - um novo material para dosagens estruturais.** Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GONZÁLEZ FONTEBOA, B. et al. Cortante-fricción de los hormigones reciclados. **Materiales de Construcción**, v. 60, n. 299, p. 53–67, 2010.

GRONDIN, F. et al. Failure risk of recycled aggregates concrete. **MATEC Web of Conferences**, v. 281, p. 01017, 2019.

JIANG, H. et al. Shear behavior of dry joints with castellated keys in Precast concrete segmental bridges. **Journal of Bridge Engineering**, v. 20, n. 2, p. 1–12, 2015.

KASSEM, M. A. et al. Shear behaviour of SHCC dry joints in precast concrete construction. **Journal of Bridge Engineering**, 2017.

KHATAB, M. A. T.; ALTMAMI, M. Correlation between different properties of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. **AIP Conference Proceedings**, v. 2146, n. August, 2019.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LI, G.; YANG, D.; LEI, Y. Combined shear and bending behavior of joints in precast concrete segmental beams with external tendons. **Journal of Bridge Engineering**, v. 18, n. 10, p. 1042–1052, 2013.

LI, Z. et al. The mechanical properties of recycled aggregate concrete. **Advanced Materials Research**, v. 671–674, p. 1852–1855, 2013.

LIU, T. et al. Shear Strength of Dry Joints in Precast UHPC Segmental Bridges: Experimental and Theoretical Research. **Journal of Bridge Engineering**, v. 24, n. 1, 2019.

LOOV, R. E. Design of precast connections. **Paper presented at a seminar organized by Compa International Pt.**, p. 8 p., 1978.

MARINKOVIĆ, S. et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255–2264, 2010.

MATTOCK, A. H. Reader Comments on Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members. **PCI Journal**, v. 32, n. 1,

p. 66–84, 1988.

MATTOCK, A. H. Shear friction and high-strength concrete. **ACI Structural Journal**, v. 98, n. 1, p. 50–59, 2001.

MATTOCK, A. H.; HAWKINS, N. M. Shear Transfer in Reinforced Concrete - Recent Research. **PCI Journal**, v. 17, n. 2, p. 55–75, 1972.

MATTOCK, A. H.; LI, W. K.; WANG, T. C. Shear transfer in lightweight concrete. **Magazine of Concrete Research**, 1976.

NAOUAOUI, K.; BOUYAHYAOU, A.; CHERRADI, T. Experimental Characterization of Recycled Aggregate Concrete. **MATEC Web of Conferences**, v. 303, n. 2019, p. 05004, 2019.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5th. ed. New York: Pearson, 2011.

PFIEL, W. **Concreto protendido**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora LTDA, 1984.

RAHAL, K. Shear strength of recycled aggregates concrete. **Procedia Engineering**, v. 210, n. December, p. 105–108, 2017.

RANDL, N. **Investigations on Transfer of Forces between Old and New Concrete at Different Joint Roughness**. [s.l.] University of Innsbruck, 1997.

RIAZ, M. R. et al. Mechanical Characterization of Recycled Aggregate Concrete. **Advances in Structural Engineering: Materials, Volume Three**, n. April, p. 1813–1822, 2015.

ROBERTS, C. L.; BREEN, J. E.; KREGGER, M. E. Measurement based revisions for segmental bridge design criteria. **Department of Transportation In**, v. 7, n. 2, 1993.

ROCHA, T. D. DA. **Análise numérica do comportamento de juntas entre aduelas de vigas protendidas**. Dissertação (Mestrado), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ROMBACH, G.; SPECKER, A. Design of joints in segmental hollow box girder bridges. **Concrete Structures in the 21th Century, FIB Osaka**, p. 1–6, 2002.

ROSENBLUM, A. **Pontes em estruturas segmentadas pré-moldadas protendidas: análise e contribuições ao gerenciamento do processo construtivo.** [s.l.] Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

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.

SHAMASS, R.; ZHOU, X.; ALFANO, G. Finite-element analysis of shear-off failure of keyed dry joints in precast concrete segmental bridges. **Journal of Bridge Engineering**, v. 20, n. 6, p. 1–12, 2015.

TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1163–1167, 2009.

TARRATACA, T. J. DE S. **Construção de pontes com aduelas pré-fabricadas.** Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

TAVARES, M. E. N. **Estudo experimental de vigas de concreto protendido - influência da variação da aderência aço-concreto na flexão.** Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

TRINDADE, J. C. **A influência do teor de agregados reciclados provenientes de concretos simples com diferentes resistências no comportamento ao atrito-cisalhamento.** Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto.** Dissertação (Mestrado), Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

TURMO, J.; RAMOS, G.; APARICIO, A. C. Resistencia de juntas secas conjugadas de puentes de dovelas prefabricadas de hormigón: Propuesta para el Eurocódigo 2. **Materiales de Construccion**, v. 56, n. 282, p. 45–52, 2006.

WALRAVEN, J.; FRÉNAY, J.; PRUIJSSERS, A. Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members. **Pci Journal**, 1987.

XIAO, J.; XIE, H.; YANG, Z. Shear transfer across a crack in recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 5, p. 700–709, 2012.

YANG, I. H.; KIM, K. C.; KIM, Y. J. Shear strength of dry joints in precast concrete modules. **The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC-13**, 2013.

ZHOU, X.; MICKLEBOROUGH, N.; LI, Z. Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges. **ACI Structural Journal**, v. 102, n. 6, p. 901–904, 2005.

ZILCH, K.; REINECKE, R. Capacity of shear joints between high-strength precast elements and normal-strength cast-in-place decks. **International symposium on high performance concrete**, 2000.