

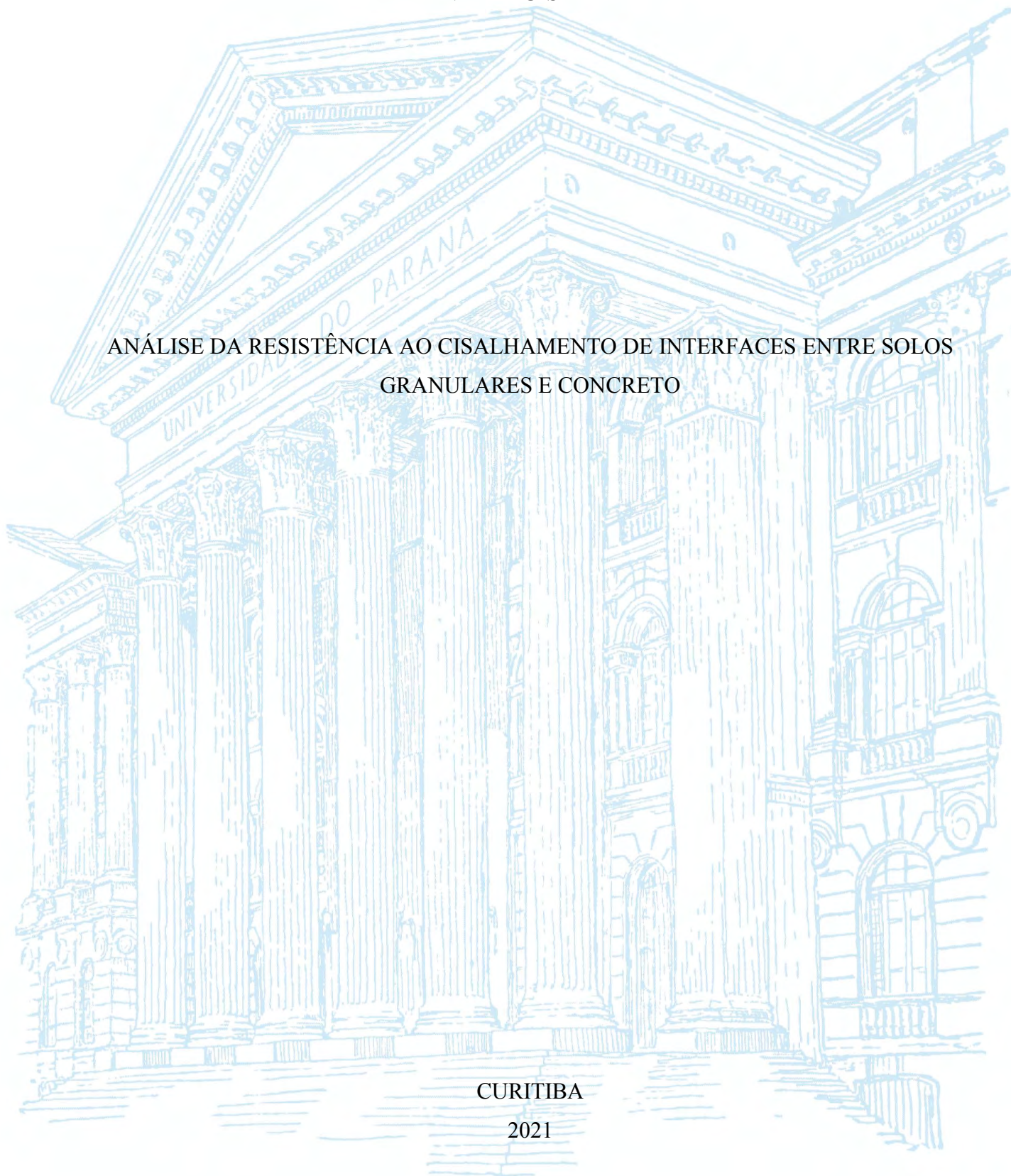
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ LUIS MEIER

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DE INTERFACES ENTRE SOLOS
GRANULARES E CONCRETO

CURITIBA

2021



ANDRÉ LUIS MEIER

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACES ENTRE SOLOS
GRANULARES E CONCRETO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Pereira Faro

Coorientador: Prof. Dr. Edgar Odebrecht

CURITIBA

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

M511a

Meier, André Luis

Análise da resistência ao cisalhamento de interfaces entre solos granulares e concreto [recurso eletrônico]/ André Luis Meier - Curitiba, 2021.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Pereira Faro

Coorientador: Prof. Dr. Edgar Odebrecht

1. Concreto. 2. Estacas de concreto. 3. Solo. I. Faro, Vitor Pereira. II. Odebrecht, Edgar. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDD 627.83

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANDRÉ LUIS MEIER** intitulada: **ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DE INTERFACES ENTRE SOLOS GRANULARES E CONCRETO**, sob orientação do Prof. Dr. VITOR PEREIRA FARO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Fevereiro de 2021.

Assinatura Eletrônica
26/02/2021 17:34:40.0
VITOR PEREIRA FARO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
18/03/2021 20:08:19.0
FERNANDO SCHNAID
Avaliador Externo (null)

Assinatura Eletrônica
27/02/2021 12:37:13.0
NALOAN COUTINHO SAMPA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica
01/03/2021 09:40:18.0
ALESSANDER CHRISTOPHER MORALES KORMANN
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste estudo marca a conclusão de uma importante etapa da minha carreira acadêmica, que pode ser realizada graças ao auxílio de diversas pessoas. Cada um dos que serão citados contribuiu de alguma forma na minha caminhada durante esses dois anos e na realização deste trabalho.

Primeiramente agradeço à minha família, em especial a minha mãe Marli e a minha irmã Vanessa, que sempre deram todo o suporte necessário para que eu pudesse completar mais esta etapa da vida. A todos os amigos que me acompanham desde à graduação e aos novos que fiz durante o mestrado por me ajudarem nesta trajetória.

Ao meu orientador, professor dr. Vitor Pereira Faro, pela sua motivação contagiante, ajuda e ideias para a pesquisa, elas me possibilitaram estar aqui hoje. Ao meu coorientador, professor dr. Edgar Odebrecht, que me acompanha desde a graduação e ao qual devo toda minha trajetória na geotecnia.

Aos membros da banca, professores Ph.D Fernando Schnaid, Dr. Alessander C. M. Kormann e Dr. Naloan C. Sampa, por aceitarem o convite de participação na banca e agregarem seus conhecimentos ao estudo.

À Mariana R. Chrusciak, por todas as explicações e dicas sobre a pesquisa. À Geoforma Engenharia Ltda., em especial aos laboratoristas Diego e João, pela grande ajuda na execução deste trabalho.

Ao professor Nixon V. Malveira pela disponibilidade e vontade de ensinar. À NTN rolamentos, em especial ao sr. Julian Kobacuk, pela realização das medições de rugosidade. Ao laboratório de Caracterização de Materiais da Engenharia Mecânica do CCT-UDESC, pela possibilidade de realização dos ensaios de micrografia das areias.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a todos os professores e técnicos que compartilharam seus conhecimentos e experiências durante todo o período do mestrado, cada um colaborou com uma parcela da minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 - pela disponibilidade de bolsa durante o mestrado para elaboração desta pesquisa.

A todos que, de alguma maneira, tiveram participação na elaboração deste estudo.

São as perguntas que não sabemos responder que mais nos ensinam. Elas nos ensinam a pensar. Se você dá uma resposta a um homem, tudo que ele ganha é um fato. Mas, se você lhe der uma pergunta, ele procurará suas próprias respostas.

Patrick Rothfuss

RESUMO

Na execução de estacas escavadas ocorrem pequenos deslocamentos ao longo do fuste devido à cura do concreto, que geram tensões cisalhantes entre a estaca e o solo, denominadas tensões residuais. Uma consequência prática desse fenômeno pode ser a extração imprecisa dos resultados de provas de carga estática. Portanto, com este estudo se busca melhorar o entendimento dos mecanismos de interação solo-estrutura na interface de estacas escavadas de concreto, moldadas em solos arenosos. Além disso, almejou-se quantificar a resistência ao cisalhamento da interface e identificar os fatores que influenciam na resposta. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em interface entre duas amostras de areia (média e grossa) e concreto curado sob tensão. A partir dos resultados dos ensaios foi analisada, de forma estatística, a influência dos fatores densidade relativa, umidade, tempo de cura e diâmetro médio dos grãos sobre a resistência ao cisalhamento da interface. Ainda, foram elaborados modelos matemáticos, através da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), que descrevem o comportamento da resistência ao cisalhamento. Esses modelos foram comparados com os resultados experimentais e foi percebida uma grande semelhança entre os valores de adesão e dos ângulos de atrito. Também foi medida a rugosidade obtida nos corpos de prova através da impressão da areia durante a cura sob tensão do concreto, que resultou em superfícies rugosas. Outro objetivo da pesquisa foi a avaliação da superfície de ruptura, realizada por meio da comparação entre medições de deslocamentos verticais da interface e da areia pura e de ensaios de cisalhamento direto em interface, através dos quais foi concluído que o cisalhamento ocorre em uma superfície areia-areia. Por fim, foi realizada a comparação dos resultados experimentais da presente pesquisa com os dados de cisalhamento na interface areia-concreto de 9 autores, através dos seguintes fatores: rugosidade, diâmetro médios dos grãos, densidade relativa, morfologia das partículas e classificação SUCS. Concluiu-se que os resultados deste estudo obtiveram valores com comportamento coerente, mas superiores à literatura. Infere-se que a causa desta discrepância sejam os dois fatores analisados neste trabalho que não foram utilizados pelos outros autores: a umidade e o tempo de cura.

Palavras chave: Interface areia-concreto. Cura sob tensão. Resistência ao cisalhamento. Rugosidade. Metodologia de Superfície de Resposta.

ABSTRACT

In the execution of bored piles, small displacements occur along the shaft due to concrete curing, which generate shear stresses between the pile and the soil, called residual stresses. A practical consequence of this phenomenon can be the inaccurate extraction of static load test results. Therefore, this study aims to improve the understanding of soil-structure interaction mechanisms at the interface of concrete bored piles, cast in sandy soils. In addition, it was intended to quantify the shear strength of the interface and identify the factors that influence the response. Direct shear tests were performed at the interface between two samples of sand (medium and coarse) and concrete cured under stress. From the test results, the influence of the factors relative density, water content, curing time and average grain diameter on the interface shear strength was statistically analyzed. Also, mathematical models were developed, through the Response Surface Methodology (RSM), that describe the behavior of the shear strength. These models were compared with the experimental results and a great similarity between the adhesion and friction angle values was noticed. The roughness obtained on the specimens was also measured through the sand impression during stress curing of the concrete, which resulted in rough surfaces. Another aim of the research was the evaluation of the rupture surface, carried out by comparing measurements of vertical displacements of the interface and pure sand and direct shear tests on the interface, through which it was concluded that shear occurs on a sand-sand surface. Finally, the comparison of the experimental results of the present research with the shear data at the sand-concrete interface of 9 authors was carried out, through the following factors: roughness, average grain diameter, relative density, particle morphology and USCS classification. It was concluded that the results of this study obtained values with consistent behavior, but higher than the literature. It is inferred that the cause of this discrepancy are the two factors analyzed in this work that were not used by other authors: water content and curing time.

Keywords: Soil-concrete interface. Curing under stress. Shear strength. Roughness. Response Surface Methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentuais dos municípios da zona costeira brasileira em 2010	20
Figura 2 - Efeitos da escavação de estacas sobre o terreno	25
Figura 3 - Estaca submetida a carga de ruptura de compressão	26
Figura 4 - Rupturas de ponta da estaca para diversas soluções teóricas.....	27
Figura 5 - Variação de K_S/K_0 em função da densidade relativa e profundidade.....	29
Figura 6 - Variação de K_S em função da densidade relativa e do deslocamento	29
Figura 7 - Variação de K_S/K_0 em função da densidade relativa e tensão vertical efetiva	30
Figura 8 - Coeficiente de atrito na interface entre areia Fujigawa e aço	34
Figura 9 - Coeficiente de atrito na interface entre areia Toyoura e aço	34
Figura 10 - Curvas coeficiente de atrito x deslocamento para interfaces entre areia e aço.....	34
Figura 11 - Curvas de deslocamento para interfaces entre areia e aço.....	35
Figura 12 - Variação do ângulo de atrito com a densidade relativa para interfaces arenosas ..	35
Figura 13 - Curvas tensão-deformação para interface entre areia seca e saturada	37
Figura 14 - Componentes da textura superficial.....	38
Figura 15 - Rugosidade normalizada.....	39
Figura 16 - Ângulo de rugosidade	40
Figura 17 - Definição da rugosidade normalizada.....	41
Figura 18 - Mecanismos de ruptura na interface	42
Figura 19 - Coeficiente de atrito na interface entre areia e aço	42
Figura 20 - Comportamento tensão-deformação das interfaces entre areia e aço	43
Figura 21 - Comparativo entre as distribuições de carga	44
Figura 22 - Deformação e variação de temperatura durante a cura do concreto	45
Figura 23 - Efeito da temperatura na interface areia-concreto	46
Figura 24 - Projetos CCD para $k=2$ e $k=3$	48
Figura 25 - Gráfico de probabilidade normal de resíduos.....	50
Figura 26 - Gráfico de resíduos <i>versus</i> resposta prevista	50
Figura 27 - Falta de ajuste de um modelo linear	51
Figura 28 - Mapa geológico da região de estudo.....	53
Figura 29 - Areia média.....	55
Figura 30 - Areia grossa	55
Figura 31 - Curvas granulométricas das areias.....	55
Figura 32 - Micrografia da areia média	56

Figura 33 - Micrografia da areia grossa.....	57
Figura 34 - Angulosidade típica dos grãos	59
Figura 35 - Materiais utilizados no concreto	60
Figura 36 - Curva granulométrica dos agregados do concreto	60
Figura 37 - Ruptura de corpo de prova de concreto	61
Figura 38 - Evolução da resistência à compressão do concreto	62
Figura 39 - Procedimento de execução do ensaio de cisalhamento direto em interface	67
Figura 40 - Vista lateral do equipamento de cisalhamento direto	68
Figura 41 - Vista superior do equipamento de cisalhamento direto	68
Figura 42 - Localização das leituras de rugosidade (escala em mm)	71
Figura 43 - Perfilômetro PCV Mahr.....	71
Figura 44 - Modelo de gráfico <i>boxplot</i>	73
Figura 45 - Diferença entre densidade relativa real e calculada.....	76
Figura 46 - Diferença entre umidade relativa real e calculada	76
Figura 47 - Variação de umidade durante o ensaio	77
Figura 48 - Deslocamento vertical: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 6h.....	78
Figura 49 - Deslocamento vertical: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h.....	78
Figura 50 - Tensão cisalhante: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 6h	79
Figura 51 - Tensão cisalhante: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h	79
Figura 52 - Coeficiente de atrito: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 6h	79
Figura 53 - Coeficiente de atrito: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h	80
Figura 54 - Deslocamento vertical: D50 0,60 mm- DR 30% - w 3% - t 6h	80
Figura 55 - Deslocamento vertical: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h.....	81
Figura 56 - Posição das tensões cisalhantes de pico.....	82
Figura 57 - Posições das tensões cisalhantes pós-pico	82
Figura 58 - Influência da densidade relativa no coeficiente de atrito.....	83
Figura 59 - Influência da umidade no coeficiente de atrito	84
Figura 60 - Influência do tempo de cura no coeficiente de atrito.....	85
Figura 61 - Influência da tensão normal no coeficiente de atrito	86
Figura 62 - Influência do diâmetro médio dos grãos no coeficiente de atrito	87
Figura 63 - Envoltória D50 0,60 mm: τ_p interface.....	88
Figura 64 - Envoltória D50 1,10 mm: τ_p interface.....	88
Figura 65 - Envoltória D50 0,60 mm: τ_{pp} interface.....	88

Figura 66 - Envoltória D50 1,10 mm: τ_{pp} interface.....	88
Figura 67 - Influência do diâmetro médio dos grãos nos ângulos de atrito.....	89
Figura 68 - Influência da (DR) na (δ/φ)	91
Figura 69 - Influência da (DR) na adesão.....	91
Figura 70 - Influência da (w) na (δ/φ)	91
Figura 71 - Influência da (w) na adesão	91
Figura 72 - Influência do (t) na (δ/φ)	91
Figura 73 - Influência do (t) na adesão.....	91
Figura 74 - Influência do (D50) na (δ/φ)	92
Figura 75 - Influência do (D50) na adesão	92
Figura 76 - Probabilidade Normal Resíduos D50 0,60 mm: τ_p interface	94
Figura 77 - Previsão x Resíduos D50 0,60 mm: τ_p interface	94
Figura 78 - Probabilidade Normal Resíduos D50 0,60 mm: τ_{pp} interface	95
Figura 79 - Previsão x Resíduos D50 0,60 mm: τ_{pp} interface	95
Figura 80 - Probabilidade Normal Resíduos D50 1,10 mm: τ_p interface	97
Figura 81 - Previsão x Resíduos D50 1,10 mm: τ_p interface	97
Figura 82 - Probabilidade Normal Resíduos D50 1,10 mm: τ_{pp} interface	99
Figura 83 - Previsão x Resíduos D50 1,10 mm: τ_{pp} interface	99
Figura 84 - Probabilidade Normal Resíduos D50 0,60 mm: τ_p areia.....	100
Figura 85 - Previsão x Resíduos D50 0,60 mm: τ_p areia	100
Figura 86 - Probabilidade Normal Resíduos D50 0,60 mm: τ_{pp} areia.....	102
Figura 87 - Previsão x Resíduos D50 0,60 mm: τ_{pp} areia	102
Figura 88 - Probabilidade Normal Resíduos D50 1,10 mm: τ_p areia.....	103
Figura 89 - Previsão x Resíduos D50 1,10 mm: τ_p areia	103
Figura 90 - Probabilidade Normal Resíduos D50 1,10 mm: τ_{pp} areia.....	104
Figura 91 - Previsão x Resíduos D50 1,10 mm: τ_{pp} areia	104
Figura 92 - Diferenças entre resultados experimentais e modelos em interface	106
Figura 93 - Diferenças entre resultados experimentais e modelos em areia	107
Figura 94 - Análise paramétrica da densidade relativa na tensão cisalhante de pico.....	108
Figura 95 - Análise paramétrica da densidade relativa na tensão cisalhante de pós-pico	109
Figura 96 - Análise paramétrica da umidade na tensão cisalhante de pico	109
Figura 97 - Análise paramétrica da umidade na tensão cisalhante de pós-pico	110
Figura 98 - Análise paramétrica do tempo de cura na tensão cisalhante de pico	110

Figura 99 - Análise paramétrica do tempo de cura na tensão cisalhante de pós-pico	111
Figura 100 - Análise paramétrica da tensão normal na tensão cisalhante de pico	111
Figura 101 - Análise paramétrica da tensão normal na tensão cisalhante de pós-pico	112
Figura 102 - Influência do diâmetro médio dos grãos nos ângulos de atrito.....	113
Figura 103 - Influência da (DR) na (δ/φ)	114
Figura 104 - Influência da (DR) na adesão.....	114
Figura 105 - Influência da (w) na (δ/φ)	114
Figura 106 - Influência da (w) na adesão	114
Figura 107 - Influência do (t) na (δ/φ).....	115
Figura 108 - Influência do (t) na adesão.....	115
Figura 109 - Influência do (D50) na (δ/φ).....	115
Figura 110 - Influência do (D50) na adesão	115
Figura 111 - D50 0,60 mm - DR 70% - w 9% - S 100 kPa - Posição A	117
Figura 112 - D50 1,10 mm - DR 70% - w 9% - S 100 kPa - Posição A	117
Figura 113 - Influência do diâmetro médio dos grãos na rugosidade média.....	119
Figura 114 - Influência do diâmetro médio dos grãos na rugosidade máxima.....	119
Figura 115 - Influência da tensão normal na rugosidade média.....	119
Figura 116 - Influência da tensão normal na rugosidade máxima.....	120
Figura 117 - Influência do diâmetro médio dos grãos na rugosidade média.....	121
Figura 118 - Influência do diâmetro médio dos grãos na rugosidade máxima.....	121
Figura 119 - Influência da densidade relativa na rugosidade média	122
Figura 120 - Influência da densidade relativa na rugosidade máxima	122
Figura 121 - Influência da umidade na rugosidade média.....	122
Figura 122 - Influência da umidade na rugosidade máxima	122
Figura 123 - Diferença entre os índices de vazios.....	124
Figura 124 - Diferença entre as umidades	124
Figura 125 - Deslocamento vertical dos ensaios de areia média (D50 0,60 mm).....	124
Figura 126 - Deslocamento vertical dos ensaios da areia grossa (D50 1,10 mm).....	125
Figura 127 - Deslocamentos verticais durante a cura do concreto	126
Figura 128 - Coeficiente de atrito x deslocamento horizontal.....	127
Figura 129 - Deslocamentos verticais x horizontais.....	128
Figura 130 - Tempo de cura 0h - Nível do concreto 0mm	129
Figura 131 - Tempo de cura 0h - Nível do concreto -2mm.....	130

Figura 132 - Tempo de cura 15h - Nível do concreto 0mm	130
Figura 133 - Tempo de cura 15h - Nível do concreto -2mm.....	131
Figura 134 - Influência da rugosidade na razão entre ângulos de atrito.....	135
Figura 135 - Influência do diâmetro médio dos grãos na razão entre ângulos de atrito.....	135
Figura 136 - Influência da densidade relativa na razão entre ângulos de atrito	136
Figura 137 - Influência da morfologia das partículas na razão entre ângulos de atrito.....	136
Figura 138 - Influência da distribuição granulométrica na razão entre ângulos de atrito	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo aproximado do coeficiente beta	28
Tabela 2 - Valores de K_s e δ	31
Tabela 3 - Valores de δ	31
Tabela 4 - Valores de ϕ'_{cv}	31
Tabela 5 - Análise de Variância para o projeto fatorial 2k.....	50
Tabela 6 - Caracterização dos grãos	56
Tabela 7 - Fatores de forma da areia média.....	58
Tabela 8 - Fatores de forma da areia grossa	58
Tabela 9 - Critérios para descrição da angulosidade	59
Tabela 10 - Traço do concreto	59
Tabela 11 - Classificação dos agregados	61
Tabela 12 - Parâmetros de processo	63
Tabela 13 - Fatores controláveis para o fatorial cruzado em interface.....	64
Tabela 14 - Fatores controláveis para a RSM em interface.....	64
Tabela 15 - Fatores controláveis para o fatorial cruzado.....	69
Tabela 16 - Fatores controláveis para o fatorial 2k	70
Tabela 17 - Fatores controláveis para a determinação da superfície de ruptura.....	72
Tabela 18 - Fatorial cruzado: Parâmetros de resistência ao cisalhamento	89
Tabela 19 - ANOVA D50 0,60 mm: τ_p interface.....	93
Tabela 20 - ANOVA D50 0,60 mm: τ_{pp} interface.....	95
Tabela 21 - ANOVA D50 1,10 mm: τ_p interface.....	96
Tabela 22 - ANOVA D50 1,10 mm: τ_{pp} interface.....	98
Tabela 23 - ANOVA D50 0,60 mm: τ_p areia	100
Tabela 24 - ANOVA D50 0,60 mm: τ_{pp} areia	101
Tabela 25 - ANOVA D50 1,10 mm: τ_p areia	102
Tabela 26 - ANOVA D50 1,10 mm: τ_{pp} areia	104
Tabela 27 - Comparação entre resultados experimentais e modelos de interface	105
Tabela 28 - Comparação entre resultados experimentais e modelos de areia	105
Tabela 29 - Intervalo de confiança dos modelos	106
Tabela 30 - RSM: Parâmetros de resistência ao cisalhamento	112
Tabela 31 - Fatorial cruzado: Parâmetros de rugosidade médios.....	118
Tabela 32 - Fatorial 2k: Parâmetros de rugosidade	120

Tabela 33 - Resultados das medições de deslocamento vertical	123
Tabela 34 - Medição dos fatores controláveis do ensaio de cisalhamento direto.....	126
Tabela 35 - Respostas do ensaio de cisalhamento direto.....	127
Tabela 36 - Referências utilizadas para coleta dos dados	131
Tabela 37 - Característica dos ensaios e razões entre ângulos de atrito	132

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p	Área da seção transversal da ponta da estaca
A_l	Área lateral da estaca
c	Intercepto coesivo do solo
C	Perímetro da estaca
c_a	Adesão da interface
CC	Coefficiente de curvatura
CU	Coefficiente de uniformidade
d	Diâmetro da estaca
d_f	Deslocamento de ensaio para ruptura
d_v	Deslocamento vertical
d_r	Velocidade de cisalhamento
DR	Densidade relativa
D50	Diâmetro médio das partículas
e, e_{min}, e_{max}	Índice de vazios natural, mínimo e máximo, respectivamente
G	Peso específico dos grãos
K_S	Coefficiente de empuxo após a instalação
K_0	Coefficiente de empuxo ao repouso
L	Comprimento da estaca
N_c, N_q, N_γ	Fatores de capacidade de carga
Q_{ult}	Resistência última
$Q_{l,ult}$	Resistência última lateral
$Q_{p,ult}$	Resistência última de ponta
R_a	Rugosidade médias
R_{max}	Rugosidade máxima
R^*_{max}	Rugosidade máxima média
R_n	Rugosidade normalizada
R^*_n	Rugosidade normalizada
t_f	Tempo de ensaio para ruptura
U	Deslocamento horizontal
u_a	Pressão de ar no solo
u_w	Poropressão de água no solo

w	Umidade do solo
W	Soma do peso próprio da estaca e do bloco de coroamento
α	Ângulo de rugosidade
α, β	Coefficientes do Método de Bjerrum-Burland
β_{ij}	Coefficientes de regressão
γ	Peso específico do solo
δ	Ângulo de atrito da interface
δ_p	Ângulo de atrito de pico da interface
δ_{pp}	Ângulo de atrito de pós-pico da interface
ε	Erro
μ	Coefficiente de atrito
ξ_p	Ângulo de dilatação de pico da interface
σ_h, σ'_h	Tensão horizontal; Tensão horizontal efetiva
σ_n	Tensão normal entre estaca e solo
σ_{vp}	Tensão vertical do solo no nível da ponta da estaca
σ_v, σ'_v	Tensão vertical; Tensão vertical efetiva
τ_a	Resistência ao cisalhamento solo-estaca
$\tau_{l,ult}$	Resistência lateral última
θ	Umidade volumétrica atual
θ_r	Umidade volumétrica residual
θ_s	Umidade volumétrica saturada
φ	Ângulo de atrito do solo
φ_p	Ângulo de atrito de pico do solo
φ_{pp}	Ângulo de atrito de pós-pico do solo

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Analysis of Variance
ASME	American Society of Mechanical Engineer
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Central Composite Design
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
GDL	Grau de Liberdade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
NBR	Norma Brasileira
PRESS	Prediction Error Sum of Squares
RSM	Response Surface Methodology
SQ	Soma Quadrada
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	ESTACAS ESCAVADAS EM SOLO ARENOSO	24
2.2	CAPACIDADE DE CARGA AXIAL ESTÁTICA	25
2.3	INTERFACE SOLO-ESTRUTURA	32
2.3.1	Características dos grãos	32
2.3.2	Condições de confinamento	33
2.3.3	Propriedades do solo.....	33
2.3.4	Umidade do solo	36
2.3.5	Características da superfície da estrutura	37
2.3.6	Tensões residuais	44
2.3.7	Temperatura	46
2.4	METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....	46
2.4.1	Funções aproximadas de resposta	47
2.4.2	Conferência do modelo.....	49
3	PROGRAMA DA PESQUISA.....	52
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	52
3.1.1	Areias	52
3.1.1.1	Características regionais	52
3.1.1.2	Ensaios de laboratório	54
3.1.2	Concreto.....	59
3.2	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	62
3.2.1	Planejamento dos ensaios.....	62
3.2.2	Metodologia de execução dos ensaios.....	65
3.3	ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	68
3.3.1	Planejamento dos ensaios.....	68
3.3.2	Metodologia de execução dos ensaios.....	70
3.4	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA.....	71
3.4.1	Planejamento dos ensaios.....	71

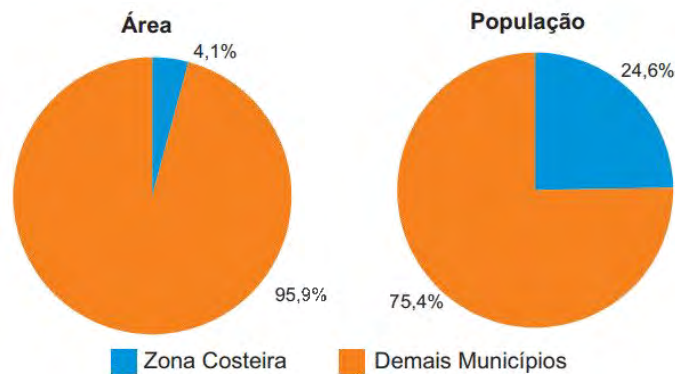
3.4.2	Metodologia de execução dos ensaios.....	72
3.5	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	73
3.6	AVALIAÇÃO DOS RUÍDOS NOS ENSAIOS.....	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
4.1	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	75
4.1.1	Análise geral dos resultados.....	75
4.1.2	Fatorial cruzado.....	82
4.1.2.1	Coefficiente de atrito	82
4.1.2.2	Parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	87
4.1.3	Metodologia de Superfície de Resposta	92
4.1.3.1	Modelos para tensão cisalhante	92
4.1.3.2	Análise paramétrica	107
4.1.3.3	Parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	112
4.2	RUGOSIDADE	116
4.2.1	Análise geral dos resultados.....	116
4.2.2	Fatorial cruzado.....	118
4.2.3	Fatorial 2k	120
4.3	SUPERFÍCIE DE CISALHAMENTO	122
4.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM A LITERATURA.....	131
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	138
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	138
5.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	138
5.3	RUGOSIDADE	140
5.4	SUPERFÍCIE DE CISALHAMENTO	141
5.5	COMPARAÇÃO COM A LITERATURA.....	141
5.6	CONCLUSÕES	142
5.7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142
	REFERÊNCIAS.....	143
	APÊNDICE 1 - RESULTADOS DO CISALHAMENTO DIRETO.....	150
	APÊNDICE 2 - RESUMO DO CISALHAMENTO DIRETO	202
	APÊNDICE 3 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE.....	210

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A verticalização dos edifícios é um aspecto cada vez mais presente nos centros urbanos, o que resulta em construções mais altas e com cargas elevadas a serem transmitidas ao solo. Uma grande parcela dessas obras se localiza na planície costeira brasileira, devida à elevada densidade demográfica da região, conforme exposto na Figura 1. Sabe-se, ainda, que a maior parte dessas planícies é originária de processos do período Quaternário, que resultaram em depósitos sedimentares, constituídos de lentes arenosas ou argilosas, de espessura variável (SUGUIO et al., 1985).

Figura 1 - Percentuais dos municípios da zona costeira brasileira em 2010



Fonte: IBGE (2012).

As fundações profundas geralmente se apresentam como as melhores alternativas para essas construções, devido à necessidade de as cargas atingirem as camadas de solo firme capazes de resistir à grandes esforços. Segundo a ABNT NBR 6122 (2019), a transmissão de cargas ao terreno por meio de uma estaca ocorre pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou pela combinação das duas.

A resistência lateral da estaca pode ser determinada através da resistência ao cisalhamento na interface solo-estaca (POULOS; DAVIS, 1980). Uma das formas de analisar a interação solo-estrutura é através de ensaios de estacas instrumentadas em campos experimentais. Contudo, a maior parte dos estudos no Brasil são referentes ao comportamento de estacas em solos argilosos (CAVALCANTE, 2006). A partir disso se notou a necessidade de ampliação dos estudos em solos granulares, resultando na criação do Campo Experimental de Araquari em 2014, cujo enfoque foram os testes em estacas de concreto, moldadas *in loco*, assentadas em solo arenoso.

Devido ao processo de execução dessas estacas escavadas ocorrem pequenos deslocamentos ao longo do fuste, que geram tensões cisalhantes entre a estaca e o solo, denominadas tensões residuais (FELLENIOUS; ALTAEE, 1995). A consequência prática desse fenômeno é a extração imprecisa dos resultados de provas de carga estática, que podem resultar em uma resistência lateral superior ao valor real e uma resistência de ponta menor (FELLENIOUS, 2020).

Portanto, com o presente estudo se objetiva melhorar o entendimento dos mecanismos de interação entre o solo e a estrutura, além de quantificar a resistência ao cisalhamento da interface. Também se almeja complementar as pesquisas desenvolvidas no Campo Experimental de Araquari, com enfoque na análise do efeito do tempo de cura sobre a resistência ao cisalhamento interface solo-concreto fresco.

Para atingir este objetivo foram realizados ensaios em interface entre duas amostras de areia (média e grossa) e concreto curado sob tensão. O concreto utilizado possuía o mesmo traço e materiais das estacas do Campo Experimental, enquanto que as areias escolhidas eram mais grossas que a de Araquari, mas com proveniência mineralógica próxima, além de uma delas ser semelhante à areia normal brasileira (IPT).

A partir dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto foi analisada, de forma estatística, a influência dos fatores densidade relativa, umidade, tempo de cura e diâmetro médio dos grãos sobre o comportamento da resistência da interface. Além disso, foram desenvolvidas superfícies de resposta que representam matematicamente os resultados experimentais. E, por fim, buscou-se comparar os resultados obtidos no presente estudo com os dados disponíveis na literatura, para maior contextualização das conclusões.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral explicar o mecanismo do comportamento da resistência ao cisalhamento na interface de estacas escavadas de concreto moldadas em solos arenosos, a partir de ensaios em laboratório de cisalhamento direto e análises estatísticas.

Para que este objetivo seja alcançado foram estipulados os seguintes objetivos específicos:

- Elaborar o programa experimental das diversas etapas do estudo;
- Selecionar os materiais e executar os ensaios de caracterização;
- Realizar os ensaios de cisalhamento direto em interface e areia pura;

- Identificar a influência dos fatores controláveis no coeficiente de atrito;
- Determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento para as condições ensaiadas;
- Desenvolver superfícies de resposta que descrevam o comportamento da resistência ao cisalhamento da interface;
- Comparar os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos de forma experimental com os gerados através de modelos matemáticos;
- Confeccionar corpos de prova de concreto curados sob tensão e realizar a medição da rugosidade da superfície impressa pelas areias média e grossa;
- Analisar os fatores que influenciam na rugosidade da superfície dos corpos de prova de concreto curados sob tensão e determinar seus valores;
- Determinar o comportamento da provável superfície de ruptura;
- Comparar os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos de forma experimental com os disponíveis na literatura.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos, este trabalho foi dividido em 5 capítulos e 3 apêndices:

No Capítulo 1 são apresentados o contexto e justificativa da pesquisa, bem como os objetivos almejados para as diversas etapas do estudo.

O Capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento do presente trabalho, onde são abordados temas referentes às fundações profundas, interface solo-estrutura e métodos estatísticos.

No Capítulo 3 são descritos os materiais utilizados neste estudo, os ensaios de caracterização dos materiais, o planejamento dos experimentos e os procedimentos para realização dos ensaios de laboratório.

O Capítulo 4 aborda a análise e discussão dos resultados obtidos no estudo, sendo dividido nos subitens: resistência ao cisalhamento (resultados experimentais e modelos estatísticos), rugosidade, superfície de cisalhamento e comparação com a literatura.

No Capítulo 5 constam as conclusões obtidas no trabalho, bem como as respostas dos objetivos geral e específicos.

O Apêndice 1 compreende os resultados gráficos dos ensaios de cisalhamento direto em interface e em areia.

No Apêndice 2 são detalhados os resumos dos resultados de cisalhamento direto em forma de tabela, contendo a verificação dos fatores controláveis e as respostas em termos de resistência ao cisalhamento.

Por fim, o Apêndice 3 consiste nos perfis de rugosidade obtidos para cada leitura nos corpos de prova de concreto, com as tabelas-resumo que indicam os valores dos parâmetros de rugosidade de cada medição.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTACAS ESCAVADAS EM SOLO ARENOSO

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019), as fundações profundas transmitem as cargas da superestrutura ao terreno através de sua base (resistência de ponta), superfície lateral (resistência de fuste) ou pela combinação das duas. Além disso, a profundidade de assentamento necessita ser superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, contudo, não inferior a 3 metros. Esse tipo de fundação compreende 3 tipos principais: estacas, tubulões e caixões. A diferença entre estacas e tubulões ou caixões está nos equipamentos ou ferramentas de execução, que não permitem a descida de operários em seu interior em nenhuma fase. Tubulões e caixões, por sua vez, possuem diferentes geometrias: o primeiro é cilíndrico, enquanto o último, prismático.

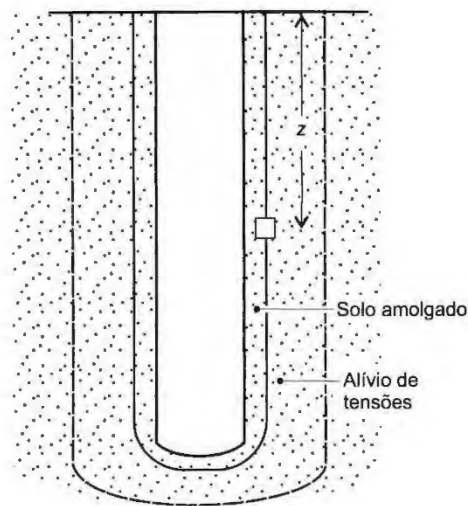
Um dos diversos tipos de fundações profundas são as estacas escavadas, cuja utilização é ampla no mercado, devido a sua versatilidade em comprimentos e diâmetros. Seu processo executivo clássico ocorre através de uma escavação cilíndrica por meio de equipamentos, que pode ser mantida estável com auxílio das técnicas de encamisamento metálico ou fluido estabilizante. Após a escavação ocorre o posicionamento da armadura da estaca e, posteriormente, o lançamento do concreto. Com término do tempo de endurecimento do concreto é realizada a preparação do topo da estaca para sua ligação ao bloco de fundação, finalizando sua execução (BORGES, 2019).

Nas fundações profundas o solo quase sempre sofre uma perturbação do seu estado natural, diferente do que ocorre nas fundações superficiais. O grau de perturbação está relacionado ao tipo e ao método executivo da fundação. Um dos efeitos da execução de estacas escavadas é o amolgamento do solo adjacente à estaca, devido à absorção da umidade do concreto fresco, à migração de água do solo para a zona do furo e à água utilizada na execução da perfuração. Além disso, dependendo do método construtivo, pode ocorrer um alívio das tensões laterais antes da instalação da fundação (VESIC, 1977; POULOS; DAVIS, 1980). Na Figura 2 podem ser visualizadas as regiões de solo amolgado e de alívio de tensões que circundam a estaca.

Conforme Velloso e Lopes (2011), o alívio de tensões não se processa de maneira imediata, pois faz parte de um processo de migração da água e comportamento viscoso do solo. Portanto, quanto menor o período entre o término da escavação e a concretagem da estaca, menor a descompressão e, portanto, menor a redução das características do solo, que irão

influenciar na sua capacidade de resistir aos esforços. Os autores ainda ressaltam que para os solos granulares os efeitos de amolgamento e alívio de tensões ainda estão presentes, entretanto, a utilização de suportes que permitem a escavação reduz o alívio de tensões. Esse comportamento foi também visto por Salgado (2008), que afirma que os efeitos produzidos pela retirada de material podem ser corrigidos caso a fluidez do concreto for adequada para manter a tensão horizontal nas paredes da escavação na condição natural.

Figura 2 - Efeitos da escavação de estacas sobre o terreno



Fonte: Adaptado de Vesic (1977 apud VELLOSO; LOPES, 2011).

2.2 CAPACIDADE DE CARGA AXIAL ESTÁTICA

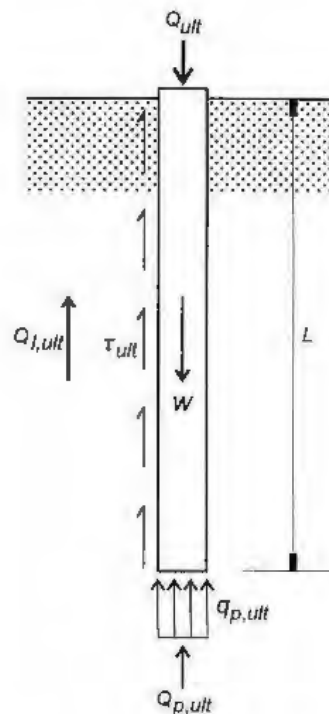
Segundo Vesic (1977), no caso de dimensionamento de fundações profundas, dois critérios básicos de segurança devem ser atendidos: resistência suficiente da estaca contra a ruptura e deslocamentos aceitáveis para as cargas de serviço. A partir desses critérios surgem os conceitos de capacidade última, que se refere à resistência estrutural da fundação ou à capacidade de suporte do solo, e de capacidade nominal de projeto, que corresponde à capacidade última dividida por um fator de segurança. Para a determinação da capacidade última da estaca, sob o ponto de vista estrutural, é assumida a ruptura quando a máxima tensão axial na fundação é igual à tensão crítica do material da estaca. Para o caso da capacidade de suporte do solo, contudo, existem diversos critérios empíricos, devido ao colapso ou a carga de pico não estarem bem definidos em algumas rupturas. O autor, todavia, indica que nesses casos a capacidade última pode ser definida como o carregamento que causa um recalque igual a 10% do diâmetro da ponta para estacas cravadas e 25% para estacas escavadas.

Para a cálculo da capacidade de carga estática de uma fundação profunda são utilizadas fórmulas que consideram a mobilização de toda resistência ao cisalhamento do solo. Um dos

tipos de métodos estáticos utilizados são os racionais, que aplicam os parâmetros do solo em soluções teóricas de capacidade de carga (VELLOSO; LOPES, 2011). A Figura 3 apresenta o problema básico para o cálculo da capacidade última da fundação, que pode ser obtida através do equilíbrio entre a carga aplicada, o peso próprio da estaca e do bloco de coroamento e a resistência do solo (Equação 1). A resistência do solo, por sua vez, pode ser dividida em duas parcelas: a resistência de ponta e a resistência lateral (POULOS; DAVIS, 1980).

$$Q_{ult} = Q_{l,ult} + Q_{p,ult} - W \quad (1)$$

Figura 3 - Estaca submetida a carga de ruptura de compressão



Fonte: Velloso e Lopes (2011).

Conforme Velloso e Lopes (2011), os primeiros métodos de determinação da resistência de ponta de estacas foram baseados na Teoria da Plasticidade e as diferentes soluções advêm da suposição dos mecanismos de ruptura, como pode ser visto na Figura 4, sendo seus autores: Terzaghi (a), Meyerhof (b), Berezantzev (c) e Vesic (d). De acordo com Poulos e Davis (1980), a resistência de ponta da estaca pode ser usualmente determinada a partir da teoria de capacidade de carga, como descrito na Equação 2. Os fatores de capacidade de carga são funções do ângulo de atrito, compressibilidade do solo e geometria da estaca. Contudo, Fellenius (2020) ressalta que a resistência de ponta não apresenta um valor final, mas continua a crescer com o aumento do recalque.

$$Q_{p, \text{ult}} = A_p \cdot (c \cdot Nc + \sigma_{vp} \cdot Nq + 0,5 \cdot \gamma \cdot d \cdot Ny) \quad (2)$$

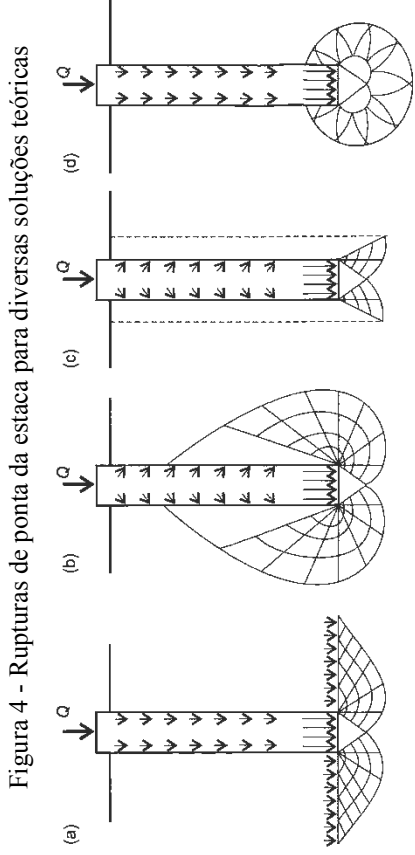


Figura 4 - Rupturas de ponta da estaca para diversas soluções teóricas

Fonte: Vesic (1965).

A resistência lateral da estaca, por sua vez, pode ser determinada através da integração da resistência ao cisalhamento na interface solo-estaca ao longo da área de contato do fuste (Equação 3). A resistência ao cisalhamento é dada pela equação de Mohr-Coulomb, indicada pela Equação 4. Ainda, a tensão horizontal efetiva pode ser reescrita em função da tensão vertical efetiva (Equação 5). Assim, a resistência lateral da estaca é dada pela Equação 6 (POULOS; DAVIS, 1980).

$$Q_{l, \text{ult}} = \int_0^L C \cdot \tau_a \, dz \quad (3)$$

$$\tau_{l, \text{ult}} = c_a + \sigma'_h \cdot \tan \delta \quad (4)$$

$$\sigma'_h = K_S \cdot \sigma'_v \quad (5)$$

$$Q_{l, \text{ult}} = \int_0^L C \cdot (c_a + K_S \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta) \, dz \quad (6)$$

Segundo Velloso e Lopes (2011), em alguns casos os valores de aderência (c_a) e ângulo de atrito de interface (δ) podem ser obtidos através de ensaios de laboratório, como os de resistência ao cisalhamento entre o material da estaca e o solo. Contudo, para os solos granulares é possível considerar que a aderência é nula, o que resulta na reescrita do atrito lateral unitário conforme a Equação 7.

$$\tau_{l, \text{ult}} = K_S \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta \quad (7)$$

Burland (1973), todavia, propõe que o produto entre o coeficiente de empuxo horizontal (K_s) e a tangente do ângulo de atrito na interface (δ) seja designada por um fator β , conforme descrito na Equação 8. Esse fator β é amplamente utilizado na prática, pois pode ser obtido diretamente das provas de cargas, através da resistência lateral. Na Tabela 1 é apresentado o intervalo aproximado do coeficiente β em função do tipo de solo, obtido através dos estudos de casos realizados por Fellenius (2008 apud FELLENIUS, 2020).

$$\beta = K_s \cdot \tan \delta = \frac{\tau_{l, ult}}{\sigma'_v} \quad (8)$$

Tabela 1 - Intervalo aproximado do coeficiente beta

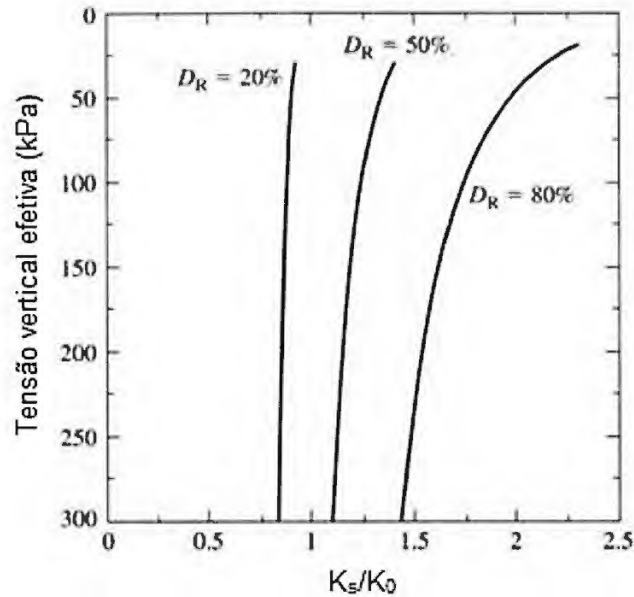
Tipo de solo	φ' (°)	β
Argila	25 a 30	0,15 a 0,35
Silte	28 a 34	0,25 a 0,50
Areia	32 a 40	0,30 a 0,90
Pedregulho	35 a 45	0,35 a 0,80

Fonte: Adaptado de Fellenius (2020).

Contudo, segundo Kulhawy (1991), devido ao fato do coeficiente β ser determinado através da junção de duas variáveis, ele engloba todos os fatores que influenciam na resistência lateral da estaca. Esse fato dificulta a compreensão dos fenômenos envolvendo a resistência lateral e na determinação de diretrizes de projeto, sendo recomendada a utilização da Equação 7.

O primeiro termo desta equação é coeficiente de empuxo horizontal (K_s), cujo valor depende do estado de tensões iniciais do solo e do método executivo, comprimento e forma da estaca. De forma geral, em estacas escavadas o valor do empuxo horizontal é igual ou menor que o coeficiente de empuxo no repouso (K_0), pois quanto mais rápida a escavação e menor o desconfinamento, mais próximo de K_0 será o valor (VELLOSO; LOPES, 2011). Todavia, Fleming *et al.* (1992) indica que para estacas construídas com concreto de fluidez elevada o valor inicial de K_s pode ser superior ao de K_0 . Ainda, Salgado (2008) analisou os efeitos da densidade relativa do solo sobre o coeficiente de empuxo horizontal, sendo que para os casos de areia fofa os valores de K_s são próximos ao de K_0 , diferente do observado para areias densas, nas quais os valores de K_s são superiores aos de K_0 . Esse fenômeno ocorre em virtude do impedimento da dilatação da superfície de ruptura, devido à presença da massa de areia e do fuste da estaca. Esse comportamento pode ser observado na Figura 5, que apresenta a razão K_s/K_0 para diferentes densidades relativas, em estacas sem deslocamento, na qual ocorre uma redução da razão com o acréscimo da profundidade, representada pela tensão vertical efetiva.

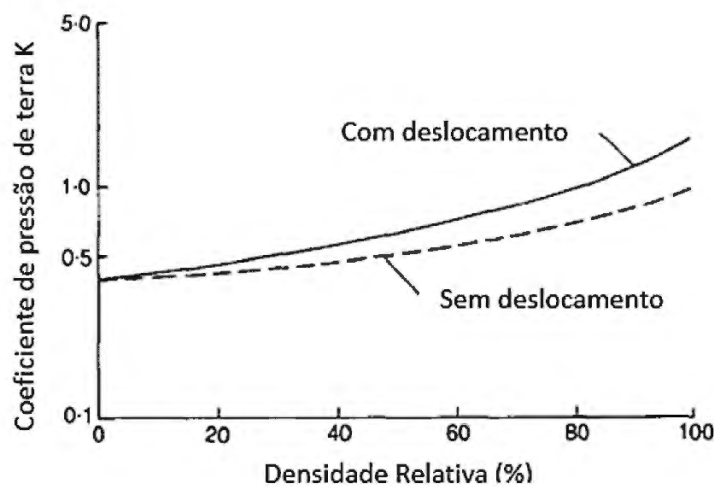
Figura 5 - Variação de K_s/K_0 em função da densidade relativa e profundidade



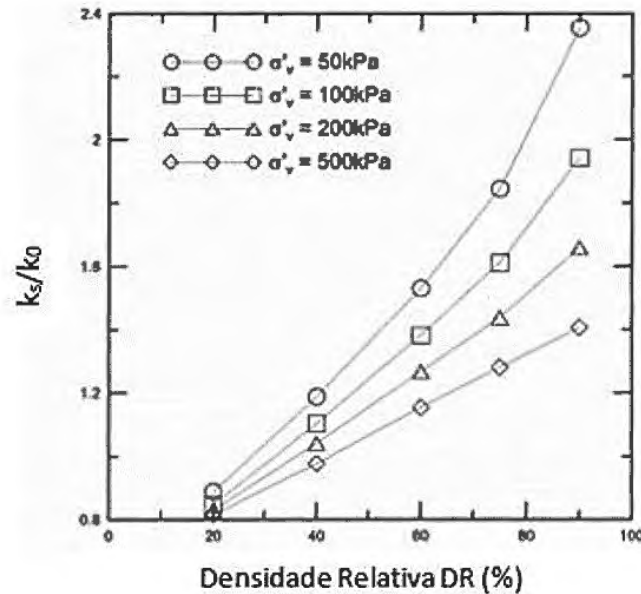
Fonte: Adaptado de Salgado (2008).

Apesar da difícil determinação apropriada do coeficiente de empuxo horizontal, alguns autores encontraram relações de K_s/K_0 , como a faixa de 0,1 a 5,0 determinada por Kulhawy (1991) e os valores de 0,8 para estacas em areia de deslocamento parcial e de 1,0 para estacas de grandes deslocamentos adotados pelo API (2002). Ainda, Kraft (1990) estabeleceu uma relação (Figura 6) entre o valor de K_s e a densidade relativa do solo, através dos deslocamentos. Por fim, tem-se a relação vista anteriormente entre K_s/K_0 , densidade relativa e tensão vertical efetiva, encontrada por Salgado (2008), que pode ser visualizada de maneira mais completa na Figura 7.

Figura 6 - Variação de K_s em função da densidade relativa e do deslocamento



Fonte: Adaptado de Kraft (1990).

Figura 7 - Variação de K_S/K_0 em função da densidade relativa e tensão vertical efetiva

Fonte: Adaptado de Salgado (2008).

A outra variável da Equação 7 é o ângulo de atrito de interface (δ), que será o objeto de estudo deste trabalho, cujos fatores de influência serão tratados no item subsequente. Contudo, com relação aos valores de δ , Salgado (2008) afirma que para estacas sem deslocamentos estes podem ser expressos em termos do ângulo de atrito no estado crítico (ϕ'_{cv}), obtido através de ensaios de cisalhamento direto, com as deformações geradas no contato solo-concreto suficientemente grandes para produzir condições de volume constante. Alguns autores (LEHANE et al., 1993; RANDOLPH, 1994; JARDINE; CHOW, 1998; SALGADO, 2008) encontraram a faixa de valores de δ entre $0,8$ e $1,0 \phi'_{cv}$. A explicação desta variação está relacionada às condições de instalação da estaca, que com alta qualidade fornece uma rugosidade da superfície do concreto superior ao diâmetro médio dos grãos, fazendo com o cisalhamento ocorra no solo junto à estaca e não na interface, o que resulta em um valor de δ igual ao de ϕ'_{cv} . Todavia, em execuções com baixa qualidade a rugosidade pode ser reduzida, indicando valores de δ iguais ou menores que $0,8 \phi'_{cv}$.

Por fim, existem na literatura estimativas iniciais de faixas de valores para os parâmetros, como pode ser visto na Tabela 2, na qual são indicados alguns valores de referência para K_S e δ em função do tipo de estaca e densidade do solo. Nesse caso, o ângulo de atrito da interface solo-concreto assumiu um valor igual ou menor que o ângulo de atrito efetivo do solo, sendo considerado igual para os casos de estacas com rugosidade normal, ou seja, com rugosidade intermediária. Também são propostos valores de δ na Tabela 3, com variação de 15 a 35° para estacas metálicas tubulares, em virtude da densidade relativa, do tipo de solo e do atrito lateral

da estaca. Ainda, pode-se obter na literatura resultados do ângulo de atrito no estado crítico (ϕ'_{cv}) para diversas areias, que indicam, de forma indireta, os valores que poderiam ser assumidos por δ . Na Tabela 4 se tem os valores de ϕ'_{cv} compilados por Lavallo (2017), constando ainda a forma dos grãos e suas características geotécnicas.

Tabela 2 - Valores de K_s e δ

Tipo de Estaca	K_s (Broms, 1966)		δ (Aas, 1966)
	Solo fofo	Solo compacto	
Aço	0,5	1	20°- 30°*
Concreto	1	2	3/4 ϕ' *
Madeira	1,5	3	2/3 ϕ'

*Tanto em estacas de aço como de concreto com rugosidade normal, é comum adotar $\delta = \phi'$

Fonte: Velloso e Lopes (2011).

Tabela 3 - Valores de δ

Densidade relativa	Descrição do solo	δ (°)	Valor limite de atrito lateral (kPa)
Muito fofo	Areia		
Fofo	Areia siltosa	15	47,8
Média	Silte		
Fofo	Areia		
Média	Areia siltosa	20	67,0
Densa	Silte		
Média	Areia		
Densa	Areia siltosa	25	81,3
Densa	Areia		
Muito densa	Areia siltosa	30	95,7
Densa	Areia		
Muito densa	Areia	35	114,8

Fonte: Adaptado de API (2002).

Tabela 4 - Valores de ϕ'_{cv}

Referência	Areia	ϕ'_{cv} (°)	Forma dos grãos	D50 (mm)	G	e_{min}	e_{max}
Lavallo (2017)	Araquari	33	Angular	0,15	2,65	0,74	1,05
Herle (1998)	Houston	32	Angular	0,35	2,65	0,63	1,01
Collins (1992)	Reid Bedfors	32	Subangular	0,24	2,66	0,55	0,87
Ishira (1993)	Toyoura	31	Subangular	0,17	2,65	0,60	0,98
Bellotti (1996)	Ticino	32	Subangular	0,58	2,67	0,58	0,93
Herle (1998)	Karlsruhe	30	Subarredondadas	0,25	2,65	0,53	0,84
Been e Jefferies (1985)	Kogyuk	30	Subarredondadas	0,35	2,65	0,53	0,86
Been e Jefferies (1987)	Monterrey	32	Subarredondadas	0,37	2,65	0,56	0,85
Marques (2016)	Osório	31	Arredondadas	0,20	2,65	0,60	0,87
Sandrekarimi (2011)	Ottawa	29	Arredondadas	0,70	2,63	0,39	0,68

Fonte: Adaptado de Lavallo (2017).

2.3 INTERFACE SOLO-ESTRUTURA

Segundo Reddy *et al.* (2000), o ensaio de cisalhamento em interface pode ser usado para estimar a capacidade de carga axial das estacas através do valor do ângulo de atrito da interface. São utilizados principalmente os ensaios de cisalhamento simples e direto, contudo, é necessário assegurar a compatibilidade entre laboratório e campo, por meio das características dos solos, das estruturas da superfície e das condições de confinamento. Isto também foi observado por Paikowsky *et al.* (1995), que concluíram que os limites físicos estabelecidos pela caixa de cisalhamento influenciaram significativamente no comportamento e na magnitude dos parâmetros de resistência. Portanto, DeJong e Frost (2002) indicam que se deve aplicar o julgamento de engenharia apropriado, sendo considerada a variabilidade do solo, o estado de tensões, a rugosidade da superfície e outros fatores que afetam a resistência da interface.

Conforme Nardelli (2019), há um consenso na literatura de que a resposta ao cisalhamento da interface é principalmente influenciada pelas seguintes condições: características dos grãos, condições de confinamento, propriedades do solo, umidade do solo, características da superfície da estrutura e temperatura. Cada um desses fatores será abordado na sequência, com enfoque nas interfaces envolvendo solos arenosos, juntamente com os efeitos das tensões residuais na interface devido à cura do concreto.

2.3.1 Características dos grãos

As características dos grãos que possuem uma influência relevante na resistência da interface são a angulosidade e a dureza das partículas. Um dos primeiros estudos sobre atrito em interfaces foi realizado por Brumund e Leonards (1973), no qual concluíram que a resistência da interface aumenta com a angulosidade e a rugosidade superficial das partículas granulares.

Uma explicação para esse comportamento é encontrada em DeJong e Westgate (2009), na qual se traz que os grãos subarredondados e lisos tendem a desenvolver grandes rotações durante o cisalhamento, devido ao baixo grau de intertravamento entre as partículas, diferente do que ocorre para os grãos angulosos, que possuem um maior intertravamento. Desta forma, quanto mais difícil o deslocamento das partículas durante o cisalhamento, maior a força necessária durante o ensaio. Contudo, os autores ressaltam que as partículas angulares são mais suscetíveis à quebra durante o ensaio, portanto, esse comportamento também é influenciado pela dureza da partícula, nível da tensão de confinamento e deslocamento total da interface.

2.3.2 Condições de confinamento

Nos ensaios de cisalhamento em interface, as condições de confinamento se referem à tensão normal aplicada ao conjunto, que possui o objetivo de simular as características de campo da tensão horizontal (DEJONG; WESTGATE, 2009).

Através de diversos estudos se percebeu que o acréscimo da tensão normal ocasionava um aumento na força da interface. A explicação para esse fato está na diminuição da dilatância da interface com o aumento da tensão de confinamento, ocorrendo um rearranjo intenso de partículas dentro de uma espessura menor da zona de cisalhamento, sendo necessários maiores deslocamentos para atingir o pico de resistência ao cisalhamento. Ainda, com o aumento da tensão normal, o comportamento tensão-deslocamento muda de amolecimento para endurecimento, reduzindo a diferença entre a resistência da interface de pico e pós-pico (JARDINE et al., 1993; TABUCANON et al., 1995; DIETZ; LINGS, 2006; GÓMEZ et al., 2008; DEJONG; WESTGATE, 2009; TIWARI; AL-ADHADH, 2014; DI DONNA et al., 2015; TEHRANI et al., 2016).

Por fim, para quantificar a relação entre a tensão de confinamento e a resistência ao cisalhamento da interface, vários autores concluíram que a envoltória de Mohr-Coulomb, apresentada na Equação 4, descreve de forma satisfatória esse comportamento (JARDINE et al., 1993; PAIKOWSKY et al., 1995; DIETZ; LINGS, 2006; DEJONG; WESTGATE, 2009).

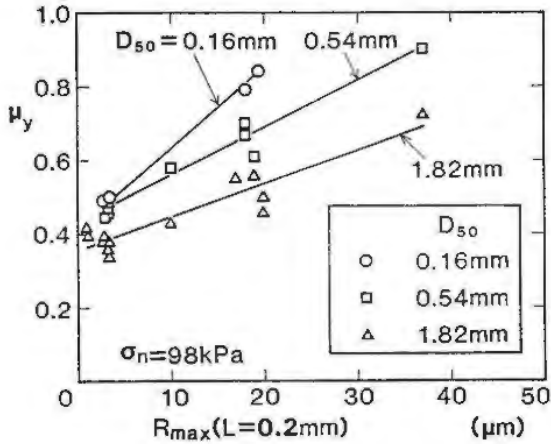
2.3.3 Propriedades do solo

As propriedades do solo com maiores efeitos sobre o comportamento e a resistência das interfaces entre solos granulares e materiais de construção são o diâmetro médio das partículas (D_{50}) e a densidade relativa (DR).

Vários autores (UESUGI; KISHIDA, 1986b; JARDINE et al., 1993; DIETZ; LINGS, 2006) estudaram a relação entre o coeficiente de atrito (μ), definido como a razão entre a tensão cisalhante e a normal, e o D_{50} . Um desses resultados pode ser observado na Figura 8, através do qual se concluiu que o coeficiente de atrito de uma interface areia-aço diminuía conforme o tamanho médio das partículas aumentava.

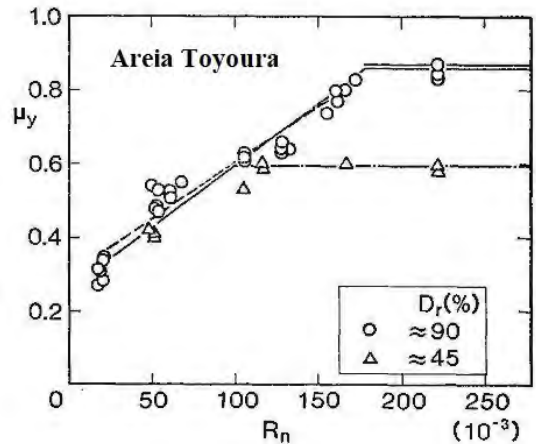
No mesmo estudo apresentado anteriormente, Uesugi e Kishida (1986b) também verificaram a relação entre o coeficiente de atrito de interface de pico e a densidade relativa. Para rugosidades normalizadas superiores a 0,1 o valor de pico do atrito na interface crescia com o aumento da densidade relativa (Figura 9).

Figura 8 - Coeficiente de atrito na interface entre areia Fujigawa e aço



Fonte: Adaptado de Uesugi e Kishida (1986b).

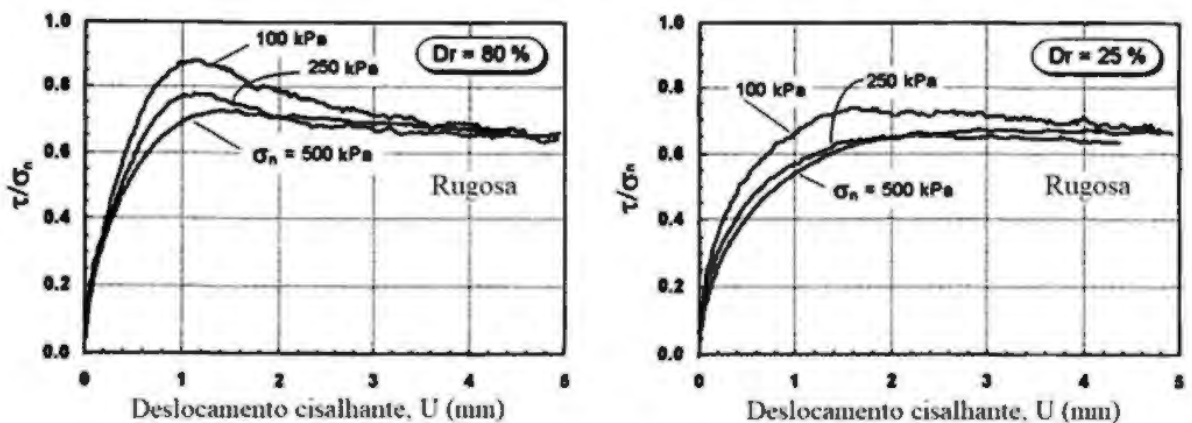
Figura 9 - Coeficiente de atrito na interface entre areia Toyoura e aço



Fonte: Adaptado de Uesugi e Kishida (1986b).

Outra influência da densidade relativa foi investigada por Fakharian e Evgin (1996), sob o ponto de vista do comportamento tensão-deformação da interface, que relacionaram essa variável com a textura da superfície. No cisalhamento contra superfícies rugosas se exibiu um comportamento de endurecimento (*hardening*) em areias fofas e de amolecimento (*softening*) em areias compactas. No caso de superfícies lisas, foi observado um comportamento de endurecimento independente da densidade relativa inicial. A Figura 10 traz uma comparação entre as curvas tensão-deformação de uma amostra cisalhada contra uma superfície rugosa para duas densidades relativas diferentes.

Figura 10 - Curvas coeficiente de atrito x deslocamento para interfaces entre areia e aço

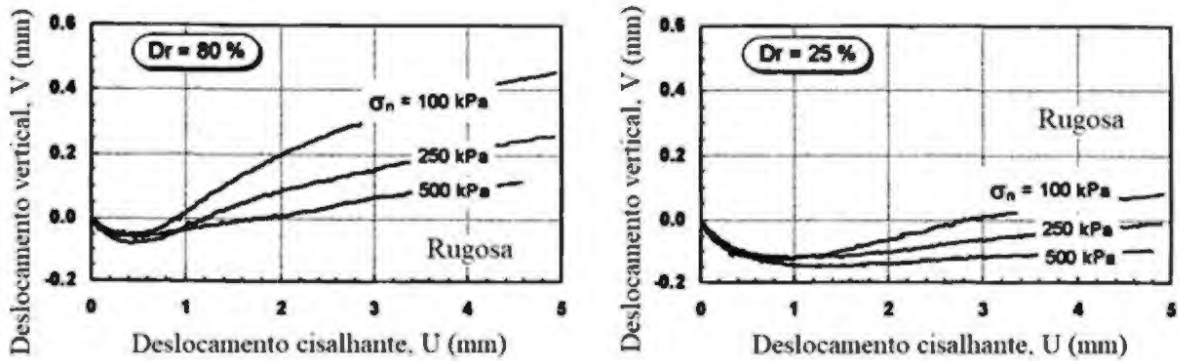


Fonte: Adaptado de Fakharian e Evgin (1996).

Com relação à variação de volume da amostra em virtude da densidade relativa, DeJong e Westgate (2009), notaram que amostras densas apresentaram inicialmente uma contração e, com o avanço das deformações, passaram a se dilatar numa região próxima à interface. Os solos

fofos, por outro lado, dilataram ao longo da zona de cisalhamento da interface, sofrendo, contudo, uma contração de volume acima dessa região. Na Figura 11 se observa o comportamento dos deslocamentos verticais e horizontais do corpo de prova durante o cisalhamento de uma interface rugosa entre areia e aço.

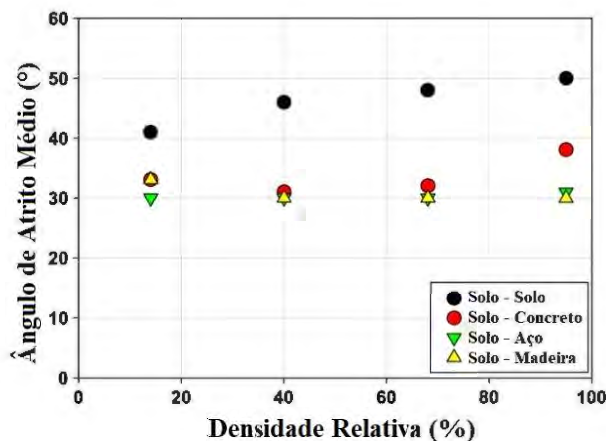
Figura 11 - Curvas de deslocamento para interfaces entre areia e aço



Fonte: Adaptado de Fakharian e Evgin (1996).

Também foi analisado o efeito da dilatância entre a interface solo-sólido e o atrito solo - solo para diferentes densidades relativas, como pode ser visto na Figura 12. Nesta relação se percebe que para todos os valores de densidade relativa, o ângulo de atrito médio de pico foi inferior para os ensaios em interface. Ainda, se percebe para os ensaios de interface solo-concreto uma tendência de aumento do ângulo de atrito de pico com a densificação do solo (LEHANE et al., 1993; TIWARI; AL-ADHADH, 2014).

Figura 12 - Variação do ângulo de atrito com a densidade relativa para interfaces arenosas



Fonte: Adaptado de Tiwari e Al-Adhadh (2014).

A zona de cisalhamento, por sua vez, foi estudada por DeJong *et al.* (2003). A espessura da região próxima a interface crescia rapidamente com o deslocamento inicial e aumentava com o seu avanço. De acordo com DeJong e Westgate (2009), os fatores que intensificam o tamanho

da zona de cisalhamento são a densidade relativa, a angularidade das partículas e a rugosidade da superfície, enquanto que as condições de confinamento e a dureza das partículas a diminuem. Com relação à espessura desta zona, os valores encontrados foram de 1 D50 para areias fofas até 12 D50 para as densas.

Contudo, o caso anterior retratava apenas o comportamento do ângulo de atrito de pico. Para a resistência de pós-pico da interface, vários autores (UESUGI; KISHIDA, 1986b; JARDINE et al., 1993; LEHANE et al., 1993; FAKHARIAN; EVGIN, 1996; REDDY et al., 2000; DIETZ; LINGS, 2006) concluíram que ela independe da densidade relativa inicial. Ainda, Dietz e Lings (2006) elaboraram a Equação 9 para o comportamento da interface para a condição de deformação plana, sendo baseada no modelo de Bolton (1986) para solos arenosos. Ela relaciona o ângulo de atrito de pico da interface (δ'_p) com o ângulo de atrito de pós-pico (δ'_{pp}) e a dilatância de pico da interface (ξ_p). Para a condição de compressão triaxial o valor do coeficiente 0,75 é reduzido para 0,50.

$$\delta'_p = \delta'_{pp} + 0,75 \cdot \xi_p \quad (9)$$

2.3.4 Umidade do solo

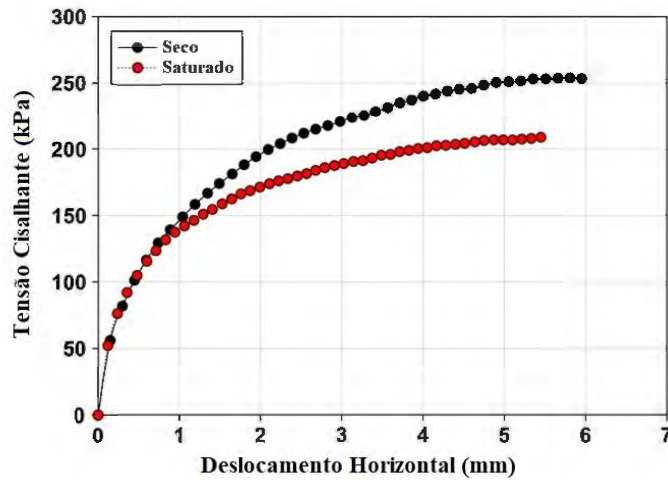
O último parâmetro envolvendo alguma característica da amostra é a umidade, que pode ser analisada a partir de três casos do solo: seco, saturado e não-saturado. As situações seca e saturada foram estudadas por Gómez *et al.* (2008) e Tiwari e Al-Adhath (2014), como exemplificado na Figura 13. Neste gráfico se nota um comportamento semelhante entre as curvas tensão-deslocamento para ambos os casos, contudo, os valores de tensão cisalhante são superiores para o solo seco.

O caso de interfaces com solos não-saturados, por sua vez, foi pesquisado por Miller e Hamid (2006) e, posteriormente, por Hamid e Miller (2009), que propuseram a utilização e validação, via ensaios de laboratórios, das equações de resistência ao cisalhamento para solos não-saturados. A Equação 10 é linear e foi proposta por Fredlund *et al.* (1978), enquanto a Equação 11, não-linear, foi elaborada por Vanapalli *et al.* (1996).

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \delta' + (u_a - u_w) \cdot \tan \delta^b \quad (10)$$

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \delta' + (u_a - u_w) \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \cdot \tan \delta' \quad (11)$$

Figura 13 - Curvas tensão-deformação para interface entre areia seca e saturada



Fonte: Adaptado de Tiwari e Al-Adhadh (2014).

Através do uso dessas equações em ensaios de cisalhamento direto de interface não-saturada foi observado que a resistência da interface aumenta com a sucção matricial e que ambas as envoltórias de ruptura, linear e não-linear, fornecem um modelo razoável (MILLER; HAMID, 2006; HAMID; MILLER, 2009).

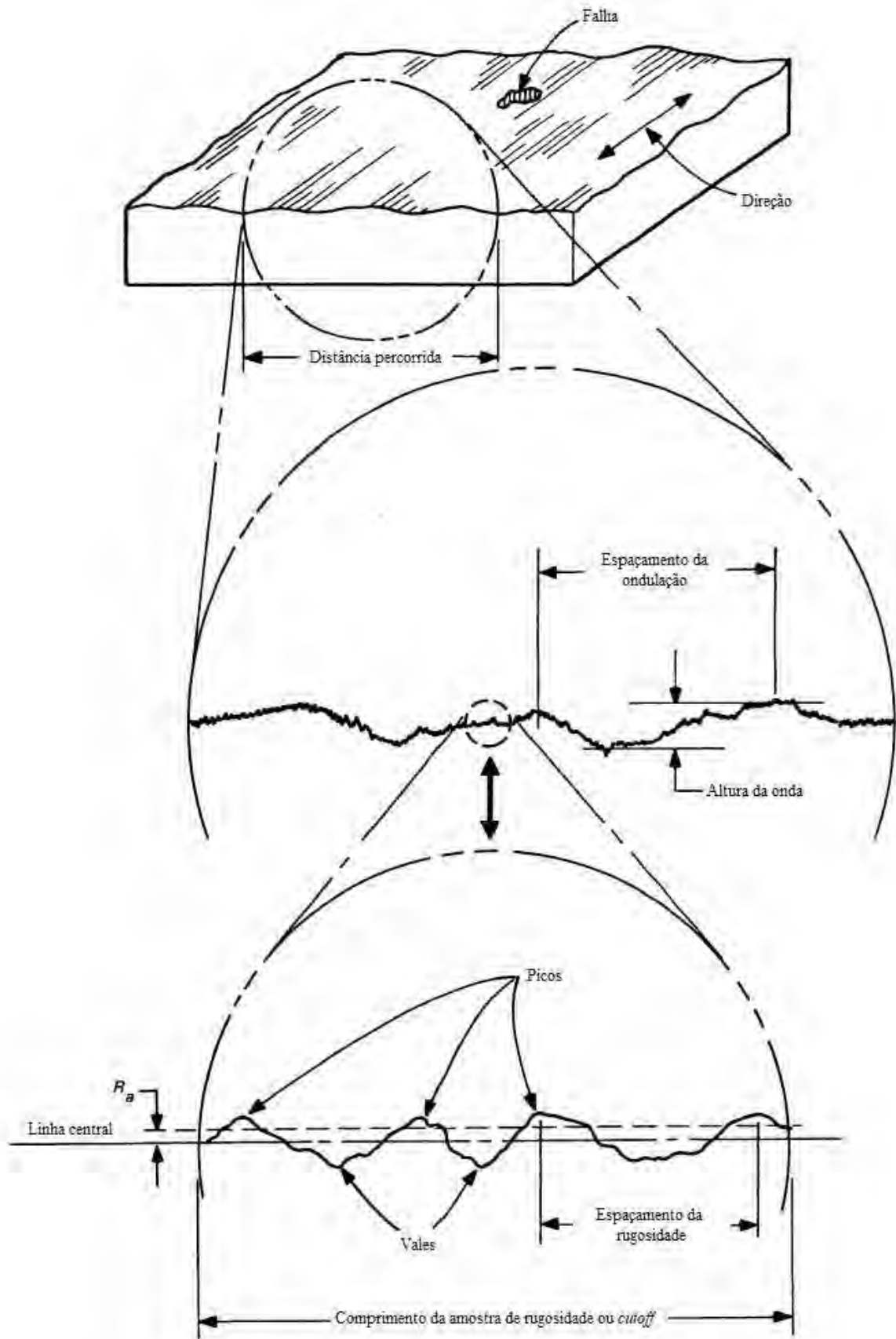
2.3.5 Características da superfície da estrutura

As duas características mais relevantes da superfície do material de construção da interface são a textura e a dureza. A norma B46.1 (ASME, 2009) define a textura de uma superfície como o desvio repetitivo ou aleatório da superfície nominal de um corpo. Essa textura da superfície inclui a rugosidade, descrita como irregularidades finas espaçadas, a ondulação, definida como o componente amplamente espaçado, a direção predominante do padrão e a falha. Na Figura 14 podem ser visualizados os diversos componentes da textura superficial.

A rugosidade média é um dos parâmetros mais aceitos para quantificar a rugosidade superficial, sendo definida como a média aritmética dos valores absolutos dos desvios de altura do perfil (Z), registrados dentro do comprimento da avaliação (L) e medidos a partir da linha média, conforme indicado na Equação 12.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (12)$$

Figura 14 - Componentes da textura superficial

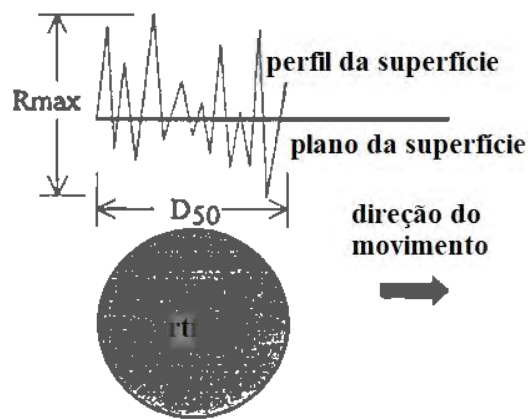


Fonte: Adaptado de ASME B46.1 (2009).

A rugosidade da superfície na resistência da interface foi estudada por Uesugi e Kishida (1986a; 1986b), que identificaram a relação entre esta e o diâmetro médio dos grãos (D_{50}). Portanto, com o intuito de avaliar de melhor forma o comportamento da resistência em virtude da textura da superfície, foi proposto o parâmetro de rugosidade normalizada (Equação 13). Nesta equação a variável R_{max} corresponde à diferença entre o pico mais alto e o vale mais baixo em uma superfície de comprimento igual a D_{50} , conforme indicado na Figura 15.

$$R_n = \frac{R_{max}}{D_{50}} \quad (13)$$

Figura 15 - Rugosidade normalizada



Fonte: Adaptado de Paikowsky *et al.* (1995).

Outra forma de caracterizar a rugosidade foi proposta por Paikowsky (1989), através de um modelo mecânico para interface areia-sólido, que utiliza a forma dos grãos e a rugosidade da superfície. O modelo é apresentado na Figura 16, no qual as partículas são consideradas elipsoides, cujo raio depende da forma do grão, e a rugosidade da superfície é considerada através de um ângulo α , localizado entre o plano de movimento e o plano de contato. O valor de R_{max} é obtido através da Equação 14, enquanto a Equação 15 fornece a R_n . O ângulo α também pode ser escrito em função da R_n através da Equação 16. Vale ressaltar, contudo, que o valor de R_n calculado apresenta a mesma relação proposta por Uesugi e Kishida (1986a; 1986b). Ainda, Paikowsky *et al.* (1995) definiram, através de ensaios de cisalhamento, três categorias baseadas no conceito de rugosidade normalizada: lisa, para $R_n < 0,02$; intermediária, para $0,02 < R_n < 0,5$; e rugosa para $R_n > 0,5$.

Figura 16 - Ângulo de rugosidade



Fonte: Adaptado de Paikowsky (1989).

$$R_{\max} = \frac{D_{50} \cdot (1 - \cos \alpha)}{2} \quad (14)$$

$$R_n = \frac{R_{\max}}{D_{50}} = \frac{1 - \cos \alpha}{2} \quad (15)$$

$$\alpha = \cos^{-1}(1 - 2 \cdot R_n) \quad (16)$$

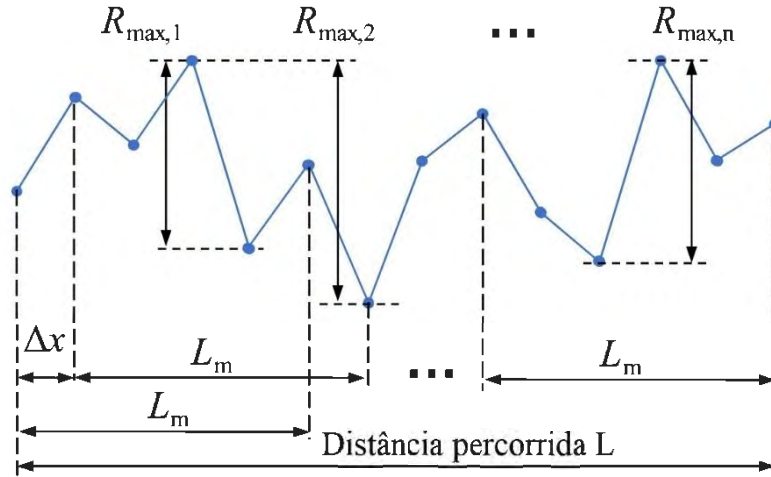
Para obtenção de uma rugosidade normalizada também se pode utilizar o método proposto por Tovar-Valencia *et al.* (2018), no qual é calculado um valor médio para a rugosidade máxima, denominado R^*_{\max} (Equação 17). O procedimento de cálculo é apresentado na Figura 17, que indica que a obtenção dos valores $R_{\max,i}$ do perfil de rugosidade ocorre de forma contínua para um comprimento $L_m = D_{50}$, que, por sua vez, avança no perfil com um deslocamento Δx , correspondente a distância entre duas leituras consecutivas.

$$R^*_n = \frac{R^*_{\max}}{D_{50}} = \frac{\sum_i^n R_{\max,i}}{n \cdot D_{50}} \quad (17)$$

A influência da rugosidade da superfície na resistência ao cisalhamento pode ser entendida por meio dos mecanismos de ruptura na interface. Para superfícies com baixos valores de rugosidade o cisalhamento entre a areia e o material da interface é governada pelo atrito entre os dois materiais. Entretanto, com o aumento da rugosidade da superfície, seus picos e vales aumentam, gerando um intertravamento das partículas de areia e aumentando o ângulo de atrito na interface. Esse aumento ocorre até um valor crítico, no qual os recessos da superfície são preenchidos por partículas de areia, que leva a superfície de ruptura a uma região adjacente à interface, com contatos areia-areia e areia-interface (BRUMUND; LEONARDS, 1973; UESUGI; KISHIDA, 1986a, 1986b; UESUGI *et al.*, 1988; PAIKOWSKY *et al.*, 1995;

DEJONG; FROST, 2002; DIETZ; LINGS, 2006; DEJONG; WESTGATE, 2009; DI DONNA et al., 2015; SAMANTA et al., 2018a).

Figura 17 - Definição da rugosidade normalizada

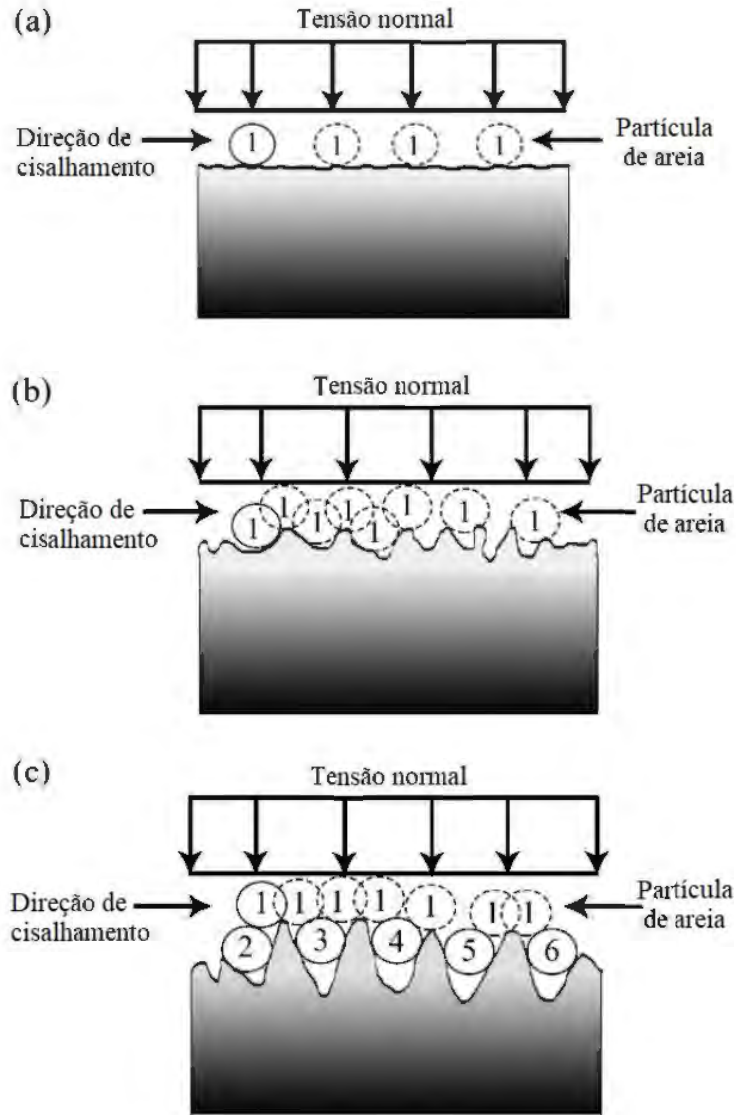


Fonte: Adaptado de Han *et al.* (2018).

Para melhor visualização das superfícies de ruptura na interface, Samanta *et al.* (2018a) desenvolveram a Figura 18, na qual em (a) é representado o deslizamento das partículas de areia (1) ao longo da superfície do material com uma baixa rugosidade superficial e em (b) o intertravamento e deslizamento das partículas (1) ao longo dos vales da superfície da interface, nesse caso com rugosidade intermediária. Em (c), por fim, é demonstrado o intertravamento dos grãos e o preenchimento dos vales da superfície com rugosidade elevada, resultando em um cisalhamento ao longo de superfície composta por areia e material da interface. Nesta figura também se nota a relação existente entre a rugosidade e o tamanho dos grãos, indicando que para superfícies com rugosidade muito inferior em comparação com o tamanho médio das partículas de areia, ocorre o deslizamento e rolagem dos grãos sobre a interface durante o cisalhamento. A existência de um intertravamento das partículas somente acontece para os casos em que a rugosidade superficial é muito maior do que o tamanho médio dos grãos.

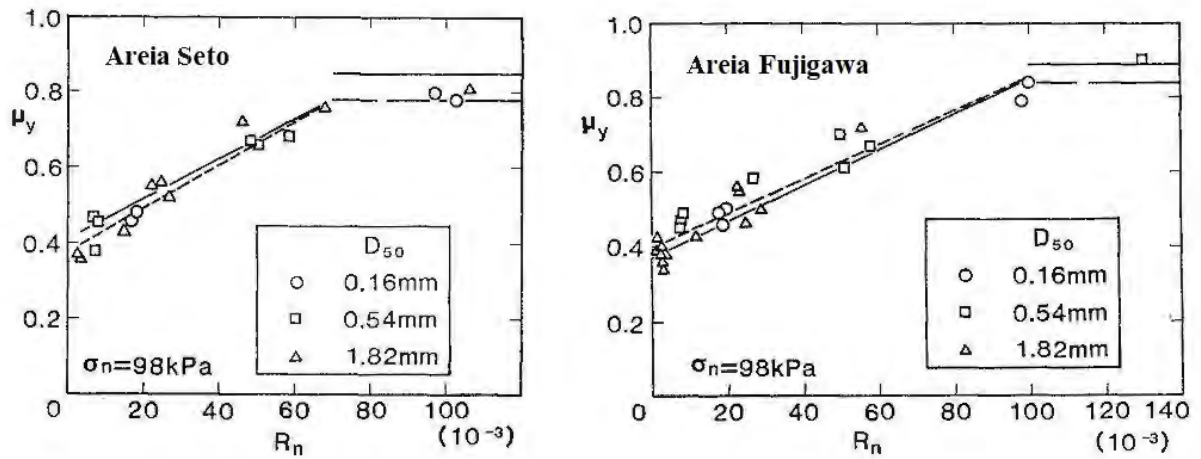
A influência da rugosidade normalizada no coeficiente de atrito foi observada por Uesugi e Kishida (1986b), que encontraram uma relação bilinear, exemplificada na Figura 19: primeiramente ocorre um crescimento do coeficiente de atrito com o aumento da rugosidade até um valor crítico, a partir do qual o valor se torna constante. Para uma interface entre areia e concreto, Uesugi *et al.* (1990) observaram que o ponto crítico de rugosidade normalizada ocorreu em torno do valor de 0,1, resultando em um coeficiente de atrito superior a 0,95.

Figura 18 - Mecanismos de ruptura na interface



Fonte: Adaptado de Samanta *et al.* (2018a).

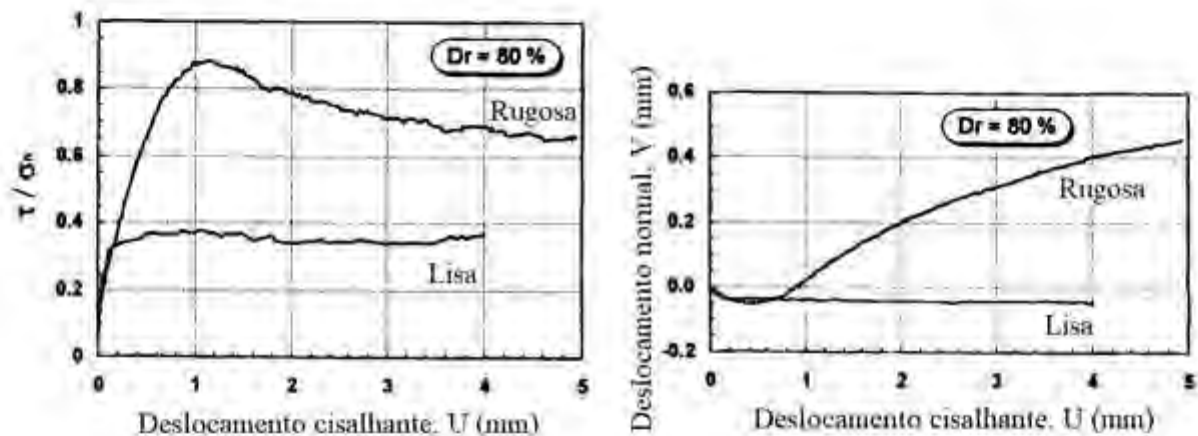
Figura 19 - Coeficiente de atrito na interface entre areia e aço



Fonte: Adaptado de Uesugi e Kishida (1986b).

Acerca do comportamento tensão-deformação, vários estudos indicaram que numa interface entre areia e uma superfície lisa ocorre um comportamento de endurecimento independente da densidade relativa, com baixos deslocamentos verticais. Entretanto, com o aumento da rugosidade o comportamento mais pronunciado é de amolecimento da curva, enquanto o deslocamento vertical sofre inicialmente uma contração e, com o avanço dos deslocamentos, passa a ter um comportamento dilatante (UESUGI et al., 1988; UESUGI et al., 1990; PAIKOWSKY et al., 1995; TABUCANON et al., 1995; FAKHARIAN; EVGIN, 1996; DIETZ; LINGS, 2006; GÓMEZ et al., 2008; DEJONG; WESTGATE, 2009; TEHRANI et al., 2016). Na Figura 20 é apresentado o comportamento descrito para interfaces entre areia compacta e aço.

Figura 20 - Comportamento tensão-deformação das interfaces entre areia e aço



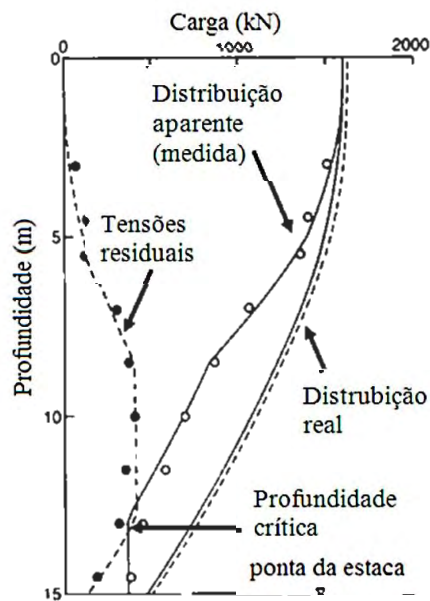
Fonte: Adaptado de Fakharian e Evgin (1996).

Por fim, a outra característica do material de construção que possui influência no comportamento da interface é a dureza, que afeta a resistência através da modificação do movimento das partículas e formação de ranhuras na superfície (NARDELLI, 2019). Vários estudos (DOVE; FROST, 1999; DEJONG et al., 2000; FROST et al., 2002) concluíram que a dureza superficial tem uma grande importância para materiais mais macios, como geomembranas, contudo, seu efeito é menos significativo em materiais de alta dureza. Ainda, foi percebida uma relação entre a rugosidade e a dureza da superfície sobre a resistência da interface: o atrito da interface era mais sensível a baixos valores iniciais de rugosidade e dureza da superfície, enquanto que para valores altos de dureza superficial, mudanças na rugosidade resultaram em efeitos mínimos. De forma complementar, Uesugi *et al.* (1990) notaram que a resistência à compressão do concreto teve um efeito insignificante sobre o valor do coeficiente de atrito.

2.3.6 Tensões residuais

Conforme Fellenius e Altaee (1995), pequenos deslocamentos que ocorrem ao longo do fuste de uma estaca são suficientes para gerar tensões cisalhantes entre a fundação e o solo, dando origem às denominadas tensões ou cargas residuais. Elas possuem esse nome pois ocorrem antes da aplicação do carregamento, em decorrência do processo de execução da estaca. Sua consequência na prática, segundo Fellenius (2020), é uma extração imprecisa dos resultados de provas de carga estática, na qual a resistência lateral da estaca será maior que o valor real, enquanto que a resistência de ponta será menor. Ainda, sem a consideração das tensões residuais, a distribuição de carga na estaca retorna uma curva que decresce com a profundidade, ou seja, que indica que a resistência do solo diminui com a profundidade. Esse comportamento, por sua vez, é o contrário do que se espera para um solo homogêneo, cuja resistência cresce com a profundidade. Na Figura 21 se tem um exemplo dos efeitos das tensões residuais na resistência lateral de uma estaca.

Figura 21 - Comparativo entre as distribuições de carga



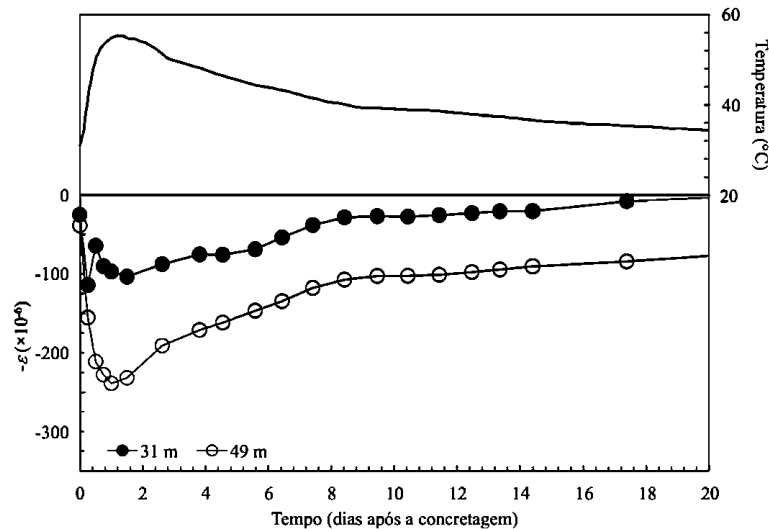
Fonte: Adaptado de Fellenius e Altaee (1995, apud SESTREM, 2018).

De acordo com Borges (2019), o concreto em cura sob tensão, como no caso de estacas escavadas, pode induzir tensões na interface entre a fundação e o solo, em virtude das deformações geradas durante a sua etapa de cura. Esse efeito é mais perceptível em estacas de grande diâmetro ($D > 1$ m), nas quais surgem deformações térmicas de retração em virtude do resfriamento do material após o término das reações exotérmicas entre a água e os componentes do cimento. As propriedades do concreto que influenciam na sua magnitude são o coeficiente

de expansão térmica dos agregados, o teor e o tipo de cimento, a proporção da mistura e a temperatura de lançamento do concreto. Todavia, segundo Holt (2001), também ocorrem outras duas parcelas de retração do concreto, denominadas autógena e por secagem. A primeira é inversamente proporcional ao fator água/cimento e ao teor de cimento, enquanto a segunda tem o comportamento oposto.

Existem poucos casos de monitoramento, através de instrumentação, das deformações no concreto em estacas escavadas durante sua cura. Contudo, o estudo de Pennington (1995) demonstra esta influência para duas estacas escavadas reais de grande diâmetro ($D = 1,5 \text{ m}$). Através da leitura de extensômetros e sensores térmicos foi possível avaliar que o aumento de temperatura, em virtude da hidratação do cimento, causa expansão na massa de concreto, conforme retratado na Figura 22. Esta expansão, todavia, é restringida pelo confinamento do solo ao redor da estaca, gerando tensões de tração no concreto e, por reação, tensões de compressão nas paredes externas da estaca.

Figura 22 - Deformação e variação de temperatura durante a cura do concreto



Fonte: Adaptado de Pennington (1995, apud BORGES, 2019).

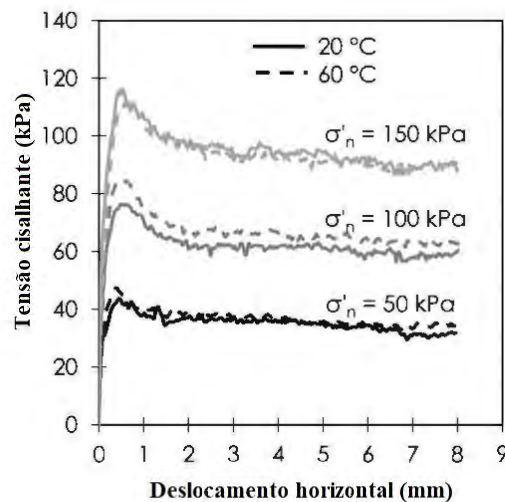
Entretanto, vale ressaltar que no início do período de cura o módulo de Young do concreto (E_c) é muito pequeno. Como esse fator é o responsável pela transformação das deformações ($\Delta\varepsilon$) entre dois níveis adjacentes (Δl) em tensões (τ), através da Equação 18, as tensões de compressão na interface solo-estaca possuem magnitude reduzida (BORGES, 2019).

$$\tau = \frac{E_c \cdot \Delta\varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{\pi \cdot D \cdot \Delta l} \quad (18)$$

2.3.7 Temperatura

Apesar de ter sido visto no item anterior a influência da temperatura no aparecimento de tensões residuais, existem ainda estudos direcionados a identificar o efeito da temperatura na resistência da interface com o concreto já endurecido. No caso de Di Donna *et al.* (2015) foi realizada uma série de testes de cisalhamento entre interfaces de areia e concreto, com uma faixa de temperatura de 20 a 60 °C. Os resultados indicaram que a resposta da interface não é afetada por mudanças de temperatura, conforme pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Efeito da temperatura na interface areia-concreto



Fonte: Adaptado de Di Donna *et al.* (2015).

2.4 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Para avaliar a influência das variáveis na resposta são necessários diversos tratamentos estatísticos, sendo a metodologia de superfície de resposta (do inglês *Response Surface Methodology* - RSM) uma ferramenta muito poderosa para esse objetivo. A RSM é uma coleção de técnicas estatísticas e matemáticas utilizadas para o desenvolvimento, melhoria e otimização de processos. Geralmente, esses problemas solucionados pela RSM se enquadram em três categorias: mapeamento de uma superfície de resposta sobre uma determinada região de interesse, otimização da resposta e seleção das condições de operação para atingir as especificações ou exigências (MONTGOMERY, 2013; MYERS et al., 2016).

A adaptação e análise das superfícies de resposta é facilitada pela escolha adequada de um projeto experimental. As características recomendáveis para um projeto de superfície de resposta são: gerar uma distribuição razoável de pontos de dados em toda a região de interesse; permitir que a adequação do modelo seja investigada; admitir a realização de experimentos em blocos; possibilitar que os projetos de ordem superior sejam construídos sequencialmente;

conceder uma estimativa interna de erro; proporcionar estimativas precisas dos coeficientes do modelo; fornecer um bom perfil da variação da previsão ao longo da região do experimento; viabilizar robustez razoável contra valores inconsistentes ou ausentes; não requerer um grande número de ensaios; não necessitar de muitos níveis de variáveis independentes; e garantir a simplicidade de cálculo dos parâmetros do modelo (MONTGOMERY, 2013; MYERS et al., 2016).

De forma simplificada, o processo de determinação da superfície de resposta envolve três etapas principais: realização dos experimentos estatisticamente projetados; estimativa dos coeficientes em um modelo matemático; previsão das respostas e verificação da adequação do modelo (SADHUKHAN et al., 2016).

2.4.1 Funções aproximadas de resposta

Na maioria dos problemas da RSM, a relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Assim, o primeiro passo é encontrar uma aproximação adequada através do uso da análise de regressão para a construção de um modelo matemático. Inicialmente, é empregado um polinômio de baixa ordem em alguma região das variáveis independentes. Caso a resposta consiga ser bem representada por essa função, o modelo é denominado de primeira ordem (Equação 19). Contudo, para os casos em que há uma curvatura no sistema, é recomendável a utilização de um polinômio de grau mais alto, como o modelo de segunda ordem (Equação 20) (MONTGOMERY, 2013).

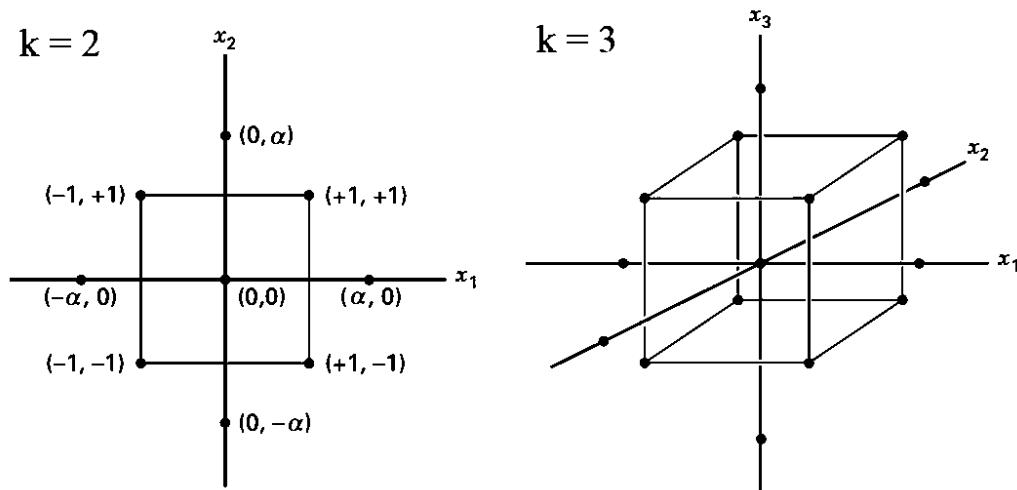
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (19)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (20)$$

Para os modelos de primeira ordem os projetos ortogonais são o único tipo de modelo que minimiza a variância dos coeficientes de regressão, sendo seu principal exemplo o fatorial 2^k . O projeto 2^k não permite uma estimativa do erro experimental, a menos que alguns ensaios sejam replicados, em geral no centro, o que não altera a variância dos coeficientes de regressão nem a propriedade de ortogonalidade (MONTGOMERY, 2013).

De acordo com Montgomery (2013), no caso dos modelos de segunda ordem a classe de projetos mais popular é o projeto central composto (do inglês *Central Composite Design* - CCD). Ele consiste de um fatorial $2k$ acrescido de n_F ensaios fatoriais, denominados axiais ou estrela, e n_C ensaios centrais. A Figura 24 mostra o CCD para $k=2$ e $k=3$ fatores. Frequentemente, a implementação prática de um CCD ocorre através de experimentos sequenciais, como a continuação de um modelo de primeira ordem $2k$ que não se ajustou.

Figura 24 - Projetos CCD para $k=2$ e $k=3$



Fonte: Montgomery (2013).

Para cada projeto CCD é necessária a especificação de dois parâmetros: a distância dos ensaios estrela do centro do projeto (α) e o número de pontos centrais (n_C). O valor de α pode ser obtido através da Equação 21 para CCD esféricos, que permite que o projeto tenha rotabilidade, ou seja, que a variância da resposta prevista seja a mesma para todos os pontos que estão a mesma distância do centro (BOX; HUNTER, 1957). Com relação ao número dos ensaios centrais, Montgomery (2013) recomenda de 3 a 5 repetições.

$$\alpha = \sqrt{k} \quad (21)$$

A grande maioria dos problemas da RSM usam um ou ambos os modelos de funções aproximadas, pois as regiões de análise são relativamente pequenas, de forma que polinômios de baixo grau conseguem as representar de forma satisfatória. O método dos mínimos quadrados é utilizado para estimar os parâmetros nos polinômios aproximados. A análise da superfície de resposta é então realizada utilizando a superfície ajustada. Caso a superfície ajustada seja adequada, essa análise pode ser considerada equivalente à análise do sistema real (MONTGOMERY, 2013; MYERS et al., 2016).

2.4.2 Conferência do modelo

A verificação da adequação dos modelos é uma parte importante do procedimento de análise de dados. Em geral, é sempre necessário examinar o modelo ajustado para assegurar que ele forneça uma aproximação adequada ao sistema real e verificar que nenhuma das hipóteses de regressão de mínimos quadrados seja violada (MYERS et al., 2016).

A adequação dos modelos matemáticos desenvolvidos pode ser estatisticamente verificada através da análise de variância (do inglês *Analysis of variance* - ANOVA), que identifica se os valores da variável de resposta medidos nos diversos níveis diferem entre si. A ANOVA consiste na decomposição da variabilidade total, ou seja, os desvios das observações individuais em relação à média global podem ser escritos em função da soma dos quadrados, graus de liberdade, médias quadradas e razão F. A hipótese de nulidade é a de que as médias são todas iguais e, em geral, são testadas para um nível de confiança de 95%. A soma dos quadrados é geralmente contribuída pelo modelo de regressão e erro residual. A média quadrada é a razão da soma dos quadrados para o grau de liberdade, enquanto a razão F é a razão da média quadrada do modelo de regressão pela média quadrada do erro residual. Se a razão F do modelo de regressão for maior que o valor tabelado padrão, tabela F, para um intervalo de confiança conhecido, então o modelo é considerado como adequado. Outra forma de representar a comparação entre as razões F é através do valor-p, que é a probabilidade de o teste estatístico assumir um valor pelo menos tão extremo quanto o valor observado quando a hipótese nula for verdadeira (MONTGOMERY, 2013; GAITONDE et al., 2017). A Tabela 5 apresenta o modelo de análise de variância para um projeto fatorial 2k.

Contudo, é necessário verificar a validade das suposições da análise de variância. Uma das formas mais simples é através dos resíduos. Se o modelo for adequado, os resíduos não devem possuir uma estrutura ou padrões óbvios. Um procedimento útil é a construção de um gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Caso a distribuição de erro for normal, o gráfico se assemelhará a uma linha reta, especialmente na porção central (Figura 25). Outra verificação simples é o gráfico entre os resíduos e os valores de resposta previstos pelo modelo (Figura 26). Da mesma forma não deve ocorrer nenhuma relação entre os valores (MONTGOMERY, 2013; MYERS et al., 2016).

Outra forma de análise de validade é através dos resíduos escalonados. Em geral, esses métodos fornecem mais informações que os resíduos advindos dos mínimos quadrados. Sua utilidade está na identificação de pontos incoerentes (*outliers*) com os dados. Os principais métodos são: resíduo padrão, previsão do erro da soma dos quadrados (do inglês *Predicted*

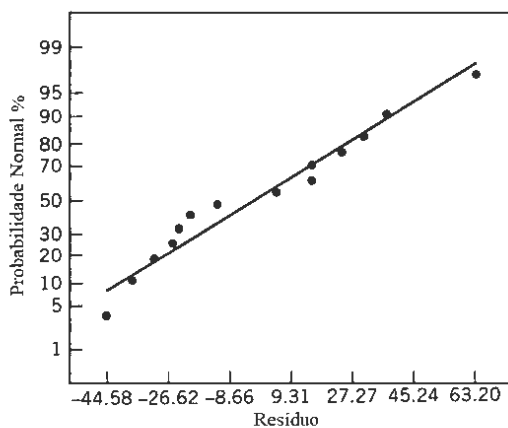
Residual Error Sum of Squares - PRESS) e *RStudent* (MONTGOMERY, 2013; MYERS et al., 2016).

Tabela 5 - Análise de Variância para o projeto fatorial 2^k

Fonte de variação	SQ	GDL
k efeitos principais		
A	SQA	1
B	SQB	1
⋮	⋮	⋮
K	SQK	1
$\binom{K}{2}$ interações de 2 fatores		
AB	SQAB	1
AC	SQAC	1
⋮	⋮	⋮
JK	SQJK	1
$\binom{K}{3}$ interações de 3 fatores		
ABC	SQABC	1
ABD	SQABD	1
⋮	⋮	⋮
IJK	SQIJK	1
⋮	⋮	⋮
$\binom{K}{K} = 1$ interações de k		
fatores		
ABC .. K	SQAB .. K	1
Erro	SQR	$2^k(n - 1)$
Total	SQT	$n2^k - 1$

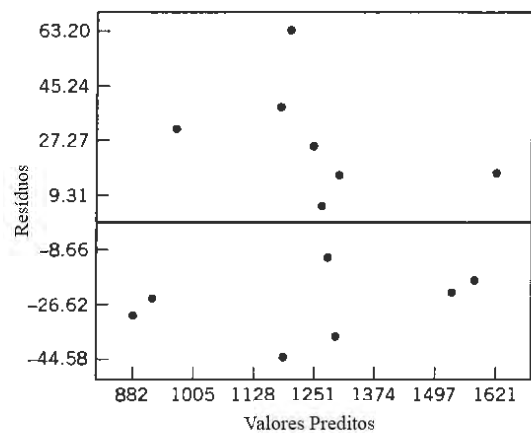
Fonte: Ribeiro e Caten (2003).

Figura 25 - Gráfico de probabilidade normal de resíduos



Fonte: Adaptado de Myers *et al.* (2016).

Figura 26 - Gráfico de resíduos versus resposta prevista

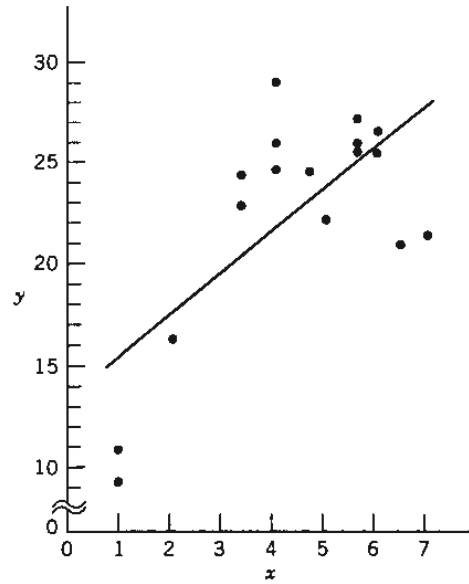


Fonte: Adaptado de Myers *et al.* (2016).

Por fim, há o teste de falta de ajuste, que avalia se o modelo se ajusta bem aos dados. O teste depende da capacidade de estimar a variação da resposta usando uma estimativa independente do modelo, ou seja, através de valores replicados dos efeitos do modelo. O teste

envolve o cálculo de uma estimativa de erro puro, com base em uma soma de quadrados, usando essas observações replicadas (MYERS et al., 2016). A Figura 27 apresenta um exemplo de falta de ajuste em modelo linear.

Figura 27 - Falta de ajuste de um modelo linear



Fonte: Myers *et al.* (2016).

3 PROGRAMA DA PESQUISA

O programa da presente pesquisa foi desenvolvido com o objetivo de caracterizar a resistência ao cisalhamento da interface entre areia e concreto curado sob tensão, através da análise dos efeitos dos fatores controláveis estabelecidos. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em areias e na interface entre areia e concreto curado sob tensão para diferentes densidades relativas, umidades, tempos de cura do concreto, tensões normais e diâmetros médios de grãos. Ainda, foi medida a rugosidade impressa nos corpos de prova de concreto e avaliada a influência desses fatores nos seus parâmetros. Além disso, buscou-se identificar a posição da provável superfície de ruptura através de medidas de deslocamento vertical e ensaios de cisalhamento direto.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Areias

As amostras de areia deste estudo são provenientes da região de Joinville, no norte do estado de Santa Catarina, coletadas através do processo de dragagem e beneficiamento da areia do Rio Cubatão. A caracterização geológica e determinação dos índices físicos dessa região compõem um artigo (MEIER et al., 2022) que foi aceito para publicação no XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Na sequência serão apresentados os tópicos relevantes ao presente estudo.

3.1.1.1 Características regionais

Conforme a classificação climática de Köppen-Geiser, o local de estudo apresenta um clima mesotérmico úmido (Cfa), cujas características são: clima temperado (C), úmido (f) e verão quente (a). A temperatura média é 21,1 °C, com uma variação anual de 8,0 °C, enquanto a pluviosidade média anual está em torno de 1700 mm (KOTTEK et al., 2006).

Na região se desenvolve uma vegetação típica de florestas, com grande número de espécies de árvores e arbustos. Essa formação vegetal faz parte do bioma mata atlântica, que constitui a floresta ombrófila densa aluvial, de terras baixas e submontanha (CHODUR, 1997).

Do ponto de vista geomorfológico, a região é composta por depósitos coluvionares, de leque aluvionar e aluvionares. Os depósitos coluvionares se desenvolvem na forma de rampas coluviais e tálus. Essas rampas são o resultado do transporte e deposição de sedimentos melhor selecionados em zonas de baixa energia, enquanto os tálus são consequência de fragmentos mal

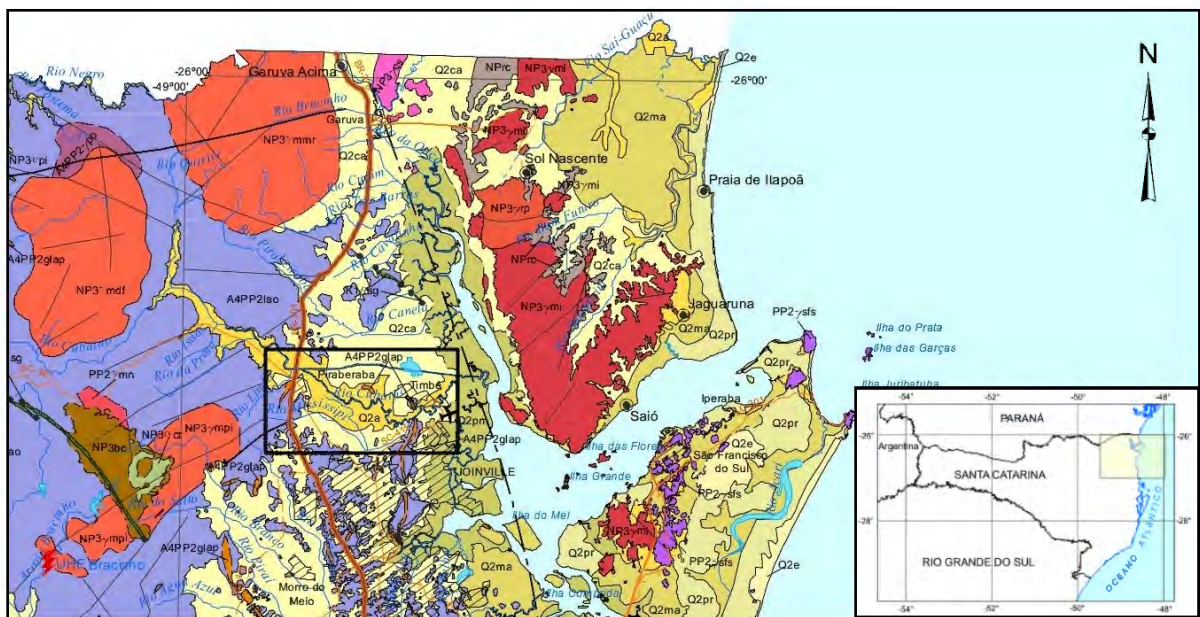
selecionados, transportados e depositados em ambientes de alta energia (FERNANDES; AMARAL, 2003 apud HORN FILHO et al. 2014).

Os depósitos de leque aluvial, por sua vez, ocorrem encaixados nas drenagens dos maciços rochosos ou em elevações isoladas em depósitos recentes e configuram superfícies em forma de leque ou cone, que são subdividas em proximal, mediano e distal. A região proximal possui materiais mais grossos, menos selecionados e de gradiente topográfico elevado, enquanto a porção distal é caracterizada como mais fina, melhor selecionada e de menor gradiente (HORN FILHO et al. 2014).

Por fim, o depósito aluvial se apresenta como um modelado de acumulação que forma a planície de inundação dos corpos hídricos, caracterizada como uma área plana sujeita a inundações periódicas. Em geral, forma um terraço fluvial plano ou levemente inclinado. Esses depósitos podem se apresentar dissecados devido às mudanças no nível de base e consequentes retomadas erosivas (HORN FILHO et al. 2014).

O município deste estudo se situa na região norte da costa catarinense, na qual se identifica geologicamente o embasamento cristalino, composto de gnaisses, migmatitos, granulitos e xistos, e o acúmulo de sedimentos que compõe os sistemas deposicionais (HORN FILHO et al. 2014). O mapa geológico da região pode ser visto na Figura 28, no qual se nota a predominância das coberturas sedimentares do Cenozóico nas regiões analisadas, sendo a estratigrafia de depósitos colúvio-aluvionares (Q2ca) e aluvionares (Q2a) preponderantes (CPRM, 2014).

Figura 28 - Mapa geológico da região de estudo



Fonte: Adaptado de CPRM (2014).

Os depósitos colúvio-aluvionares têm como distribuição litoestratigráfica os conglomerados, arenitos conglomeráticos, areia grossa a fina, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos recobrimdo vertentes e encostas, calhas de rios e planícies de inundação. Além disso, incluem os depósitos eluvionares recentes, de expressão restrita, com grande variação granulométrica e estratificação incipiente ou ausente. Os depósitos aluvionares, por sua vez, tem como característica areias grossas a finas, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos, em calhas de rios e planícies de inundação (CPRM, 2014).

A idade dos depósitos coluvionares e aluvionares é do Quaternário indiferenciado, que vai de 2 milhões de anos atrás até o presente. Um dos principais fatores de formação desses depósitos foi a variação do nível relativo do mar durante o desenvolvimento do quaternário, que fez com que a parte central do litoral do Brasil fosse sujeita a altos níveis marinhos. Uma das últimas principais variações aconteceu a 120 mil anos, no qual o nível do mar estava a 8 m acima do nível atual, enquanto a última registrada foi há, aproximadamente, 5,1 mil anos, atingindo entre 4 e 5 m acima do atual (SUGUIO et al., 1986).

3.1.1.2 Ensaios de laboratório

Foram coletadas duas amostras deformadas da dragagem do rio Cubatão, denominadas média (Figura 29) e grossa (Figura 30). A escolha se deu por duas razões: a busca por areias com granulometrias mais grosseiras que as do Campo Experimental de Araquari, para continuidade do estudo Chrusciak (2021), e a semelhança da areia média com a areia normal brasileira (IPT), utilizada na moldagem de corpos de prova de concreto para teste do cimento Portland (ABNT NBR 7214, 2015).

Os ensaios de laboratório realizados para a caracterização das areias do rio Cubatão foram: determinação da massa específica real dos grãos (ABNT NBR 6508, 2016), análise granulométrica (ABNT NBR 7181, 2016), índice de vazios máximo (ABNT NBR 12004, 1990) e mínimo (ABNT NBR 12051, 1991). Nos ensaios de índice de vazios foi optado pelo método B, com a utilização de uma mesa vibratória.

A partir da distribuição granulométrica foi obtido o diâmetro médio dos grãos (D50), que representa o diâmetro abaixo do qual se situam 50% em peso das partículas. Utilizando esse critério, a areia média do rio Cubatão foi denominada D50 0,60 mm e a areia grossa D50 1,10 mm. Na Figura 31 são apresentadas as curvas granulométricas dessas duas amostras, bem como da areia do Campo Experimental de Araquari (CHRUSCIK, 2021) e da areia normal brasileira (ABNT NBR 7214, 2015).

Figura 29 - Areia média



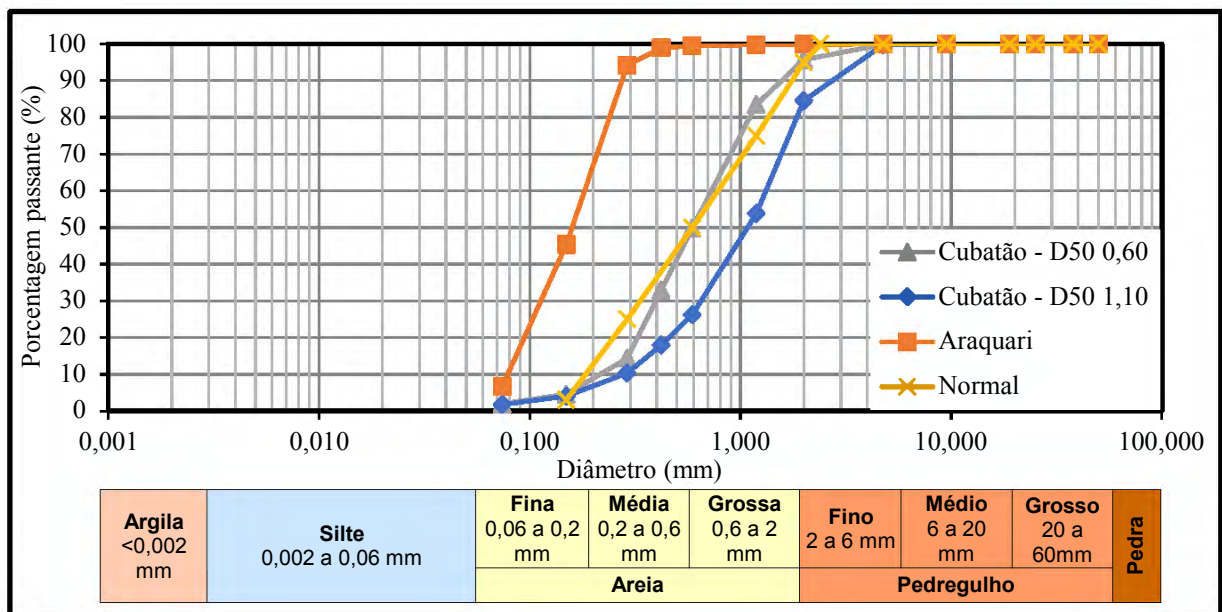
Fonte: O autor.

Figura 30 - Areia grossa



Fonte: O autor.

Figura 31 - Curvas granulométricas das areias



Fonte: O autor.

A partir das curvas granulométricas foi possível realizar a classificação das amostras através do SUCS, apresentadas na Tabela 6. Nesta tabela também podem ser visualizados os valores de D50, do coeficiente de não uniformidade (CU), do coeficiente de curvatura (CC), de massa específica real dos grãos (G) e dos índices de vazios máximo (e_{max}) e mínimo (e_{min}). Todos os materiais apresentaram a mesma classificação, de areia mal graduada (SP), e as areias do rio Cubatão cumpriram os dois critérios estipulados: D50 de 0,60 e 1,10 superiores ao

da areia de Araquari (D50 0,19 mm), e D50 0,60 mm com características muito semelhantes às da areia normal (D50 0,59 mm).

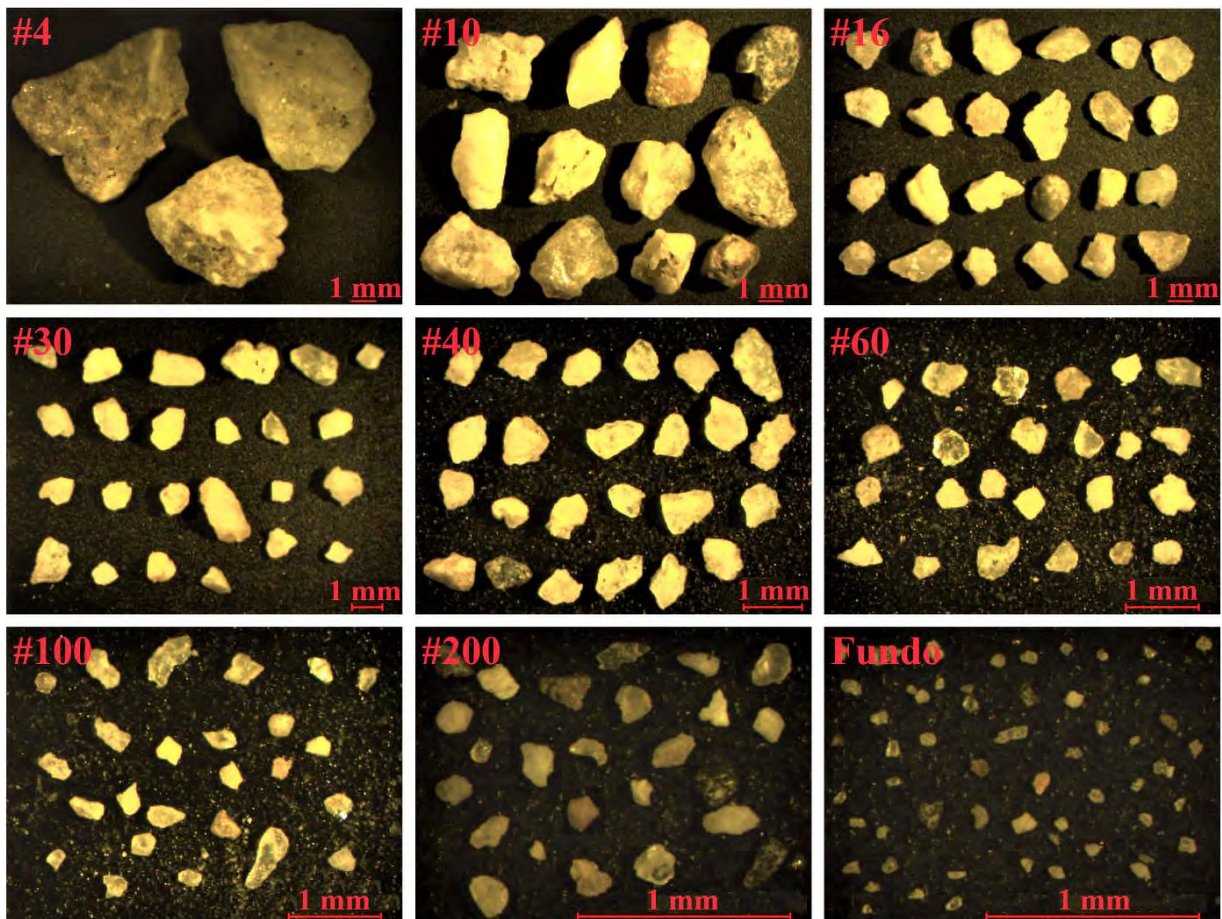
Tabela 6 - Caracterização dos grãos

Descrição	D50 (mm)	CU	CC	SUCS	G (g/cm ³)	emin	emax
Cubatão	0,60	3,36	0,98	SP	2,660	0,62	0,79
Cubatão	1,10	5,18	0,95	SP	2,649	0,62	0,72
Araquari	0,19	2,38	0,95	SP	-	-	-
Normal	0,59	4,21	0,76	SP	-	-	-

Fonte: O autor.

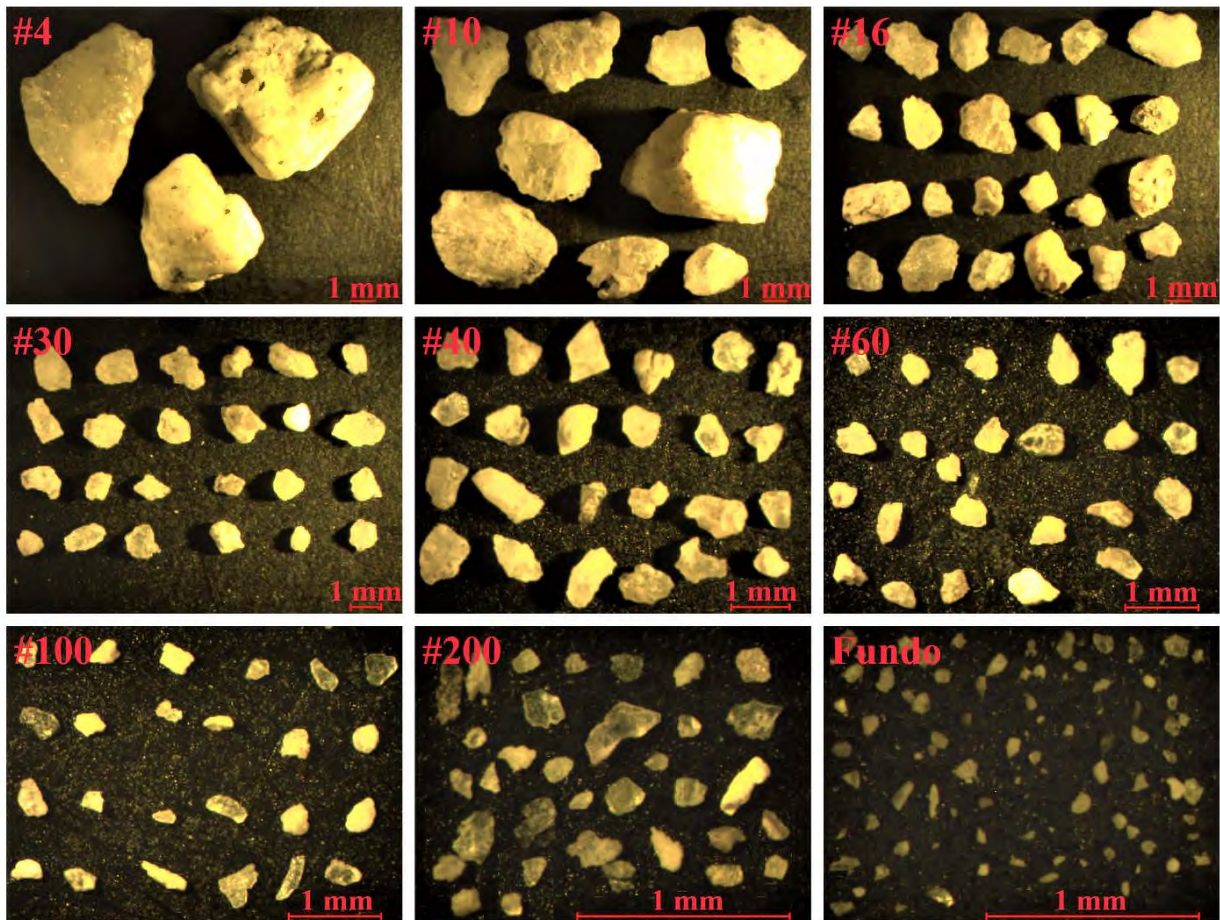
Para identificar o formato dos grãos foi realizada, ainda, a micrografia das areias, sendo analisadas as partículas retidas em cada peneira da granulometria. Na Figura 32 são apresentados os grãos da areia média (D50 0,60 mm) e na Figura 33 os da areia grossa (D50 1,10 mm).

Figura 32 - Micrografia da areia média



Fonte: O autor.

Figura 33 - Micrografia da areia grossa



Fonte: O autor.

A partir das fotografias foram realizadas medições para determinar os fatores de forma dos grãos: a circularidade (Equação 22) e o arredondamento (Equação 23). Ambas as medidas comparam o formato do grão com o de um círculo perfeito, variando de zero a um. A circularidade (*circularity*) indica, essencialmente, a suavidade da borda do grão, enquanto o arredondamento (*roundness*) representa o formato do grão, com formas mais alongadas quanto menor o seu valor.

$$\text{Circularidade} = \frac{4\pi \cdot \text{área}}{\text{perímetro}^2} \quad (22)$$

$$\text{Arredondamento} = \frac{4 \cdot \text{área}}{\pi \cdot (\text{eixo maior})^2} \quad (23)$$

Na Tabela 7 temos os valores referentes a areia média (D50 0,60 mm) e na Tabela 8 da areia grossa (D50 1,10 mm), nas quais consta o número (n) de grãos utilizados em cada análise,

a peneira correspondente, os valores de circularidade, arredondamento e a porcentagem de cada diâmetro de grãos na curva granulométrica. Com aplicação de uma média ponderada pela porcentagem da granulometria foi possível definir um valor de circularidade e arredondamento para cada amostra.

Tabela 7 - Fatores de forma da areia média

D50 (mm)	n	Peneira	Circularidade	Arredondamento	Granulometria (%)
0,60	3	#4	0,709	0,809	0,809
	12	#10	0,721	0,702	0,702
	23	#16	0,748	0,744	0,744
	24	#30	0,782	0,765	0,765
	24	#40	0,755	0,731	0,731
	23	#60	0,765	0,798	0,798
	25	#100	0,761	0,712	0,712
	39	#200	0,755	0,718	0,718
	48	Fundo	0,818	0,722	0,722
Média Ponderada			0,766	0,753	

Fonte: O autor.

Tabela 8 - Fatores de forma da areia grossa

D50 (mm)	n	Peneira	Circularidade	Arredondamento	Granulometria (%)
1,10	3	#4	0,760	0,813	0,19
	9	#10	0,728	0,759	15,26
	24	#16	0,772	0,745	30,75
	24	#30	0,778	0,752	27,55
	24	#40	0,739	0,719	8,33
	23	#60	0,765	0,742	7,61
	24	#100	0,738	0,660	6,28
	45	#200	0,738	0,709	2,29
	49	Fundo	0,809	0,720	1,74
Média Ponderada			0,761	0,740	

Fonte: O autor.

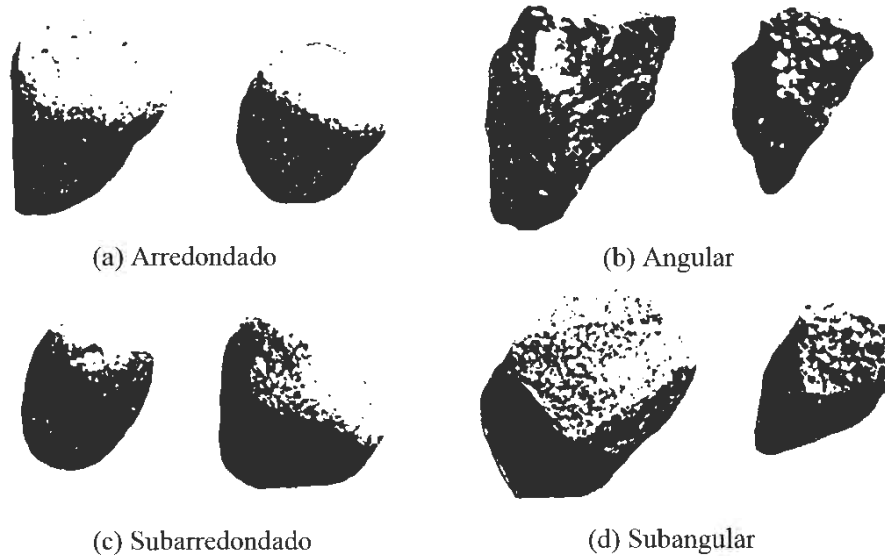
Para a classificação da angulosidade dos grãos foram utilizados os critérios da norma D2488 (ASTM, 2017), apresentados na Tabela 9 e na Figura 34. Devido à semelhança visual e à descrição dos grãos, as duas areias foram classificadas como subangulares.

Tabela 9 - Critérios para descrição da angulosidade

Descrição	Critério
Angular	As partículas têm bordas angulosas e laterais relativamente planas, com superfícies foscas
Subangular	As partículas são similares às angulosas, mas possuem bordas arredondadas
Subarredondada	As partículas têm laterais quase planas, mas possuem arestas e bordas bem arredondadas
Arredondada	As partículas possuem laterais suavemente curvas e não há bordas

Fonte: Adaptado de ASTM (2017).

Figura 34 - Angulosidade típica dos grãos



Fonte: Adaptado de ASTM (2017).

3.1.2 Concreto

Para o ensaio cisalhamento direto em interface foi necessária a preparação dos corpos de prova de concreto a serem curados sob tensão. O traço definido foi proposto por Nienov (2016), referente às estacas utilizadas no Campo Experimental de Araquari. Na Tabela 10 estão apresentadas as características do concreto. Os materiais utilizados são apresentados na Figura 35, sendo (A) a areia (agregado miúdo), (B) o cimento CP-IV Votoran RS, (C) a brita (agregado graúdo) e (D) o aditivo superplastificante MC Powerflow 1180.

Tabela 10 - Traço do concreto

Composição	Traço estaca	Unidade
Abatimento	23 +/- 2	cm
Água	216	kg
Cimento CP IV	415	kg
Areia	800	kg
Brita 0	870	kg
Aditivo	3,0	litros

Fonte: Adaptado de Nienov (2016).

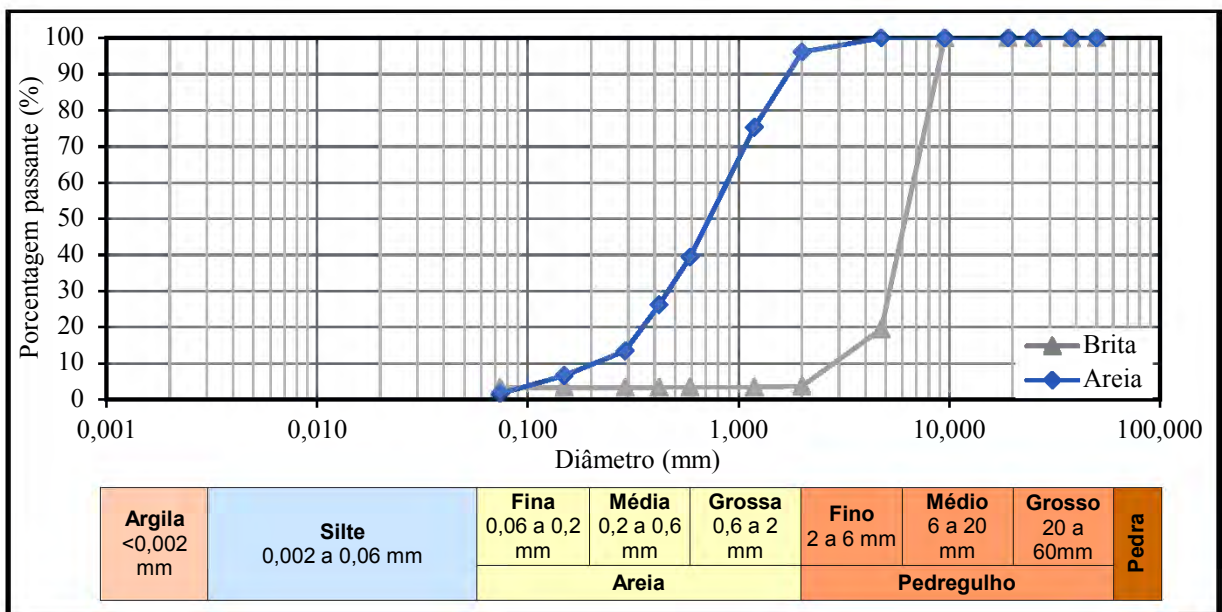
Figura 35 - Materiais utilizados no concreto



Fonte: O autor.

Os materiais foram os mesmos utilizados na confecção das estacas do Campo Experimental de Araquari. Foi realizada a análise granulométrica dos agregados (ABNT NBR 7181, 2016), apresentada na Figura 36. Nota-se que para a brita foram buscados diâmetros inferiores a 10 mm, correspondente a 10% da lateral da caixa do ensaio de cisalhamento direto.

Figura 36 - Curva granulométrica dos agregados do concreto



Fonte: O autor.

Ainda, a partir das curvas granulométricas foi determinada a classificação SUCS dos materiais (Tabela 11), pela qual a brita foi classificada como pedregulho mal graduado (GP) e a areia também como mal graduada (SP).

Tabela 11 - Classificação dos agregados

Descrição	D50 (mm)	CU	CC	SUCS
Brita	6,20	2,43	1,42	GP
Areia	0,72	4,50	1,18	SP

Fonte: O autor.

A resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}) foi especificada em 20 MPa, portanto, realizou-se a moldagem de 6 corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro por 10 cm de altura), seguindo os procedimentos estipulados pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Na Figura 37 está exemplificada a ruptura de um dos corpos de prova de 7 dias, cujo tipo foi classificado como cisalhado.

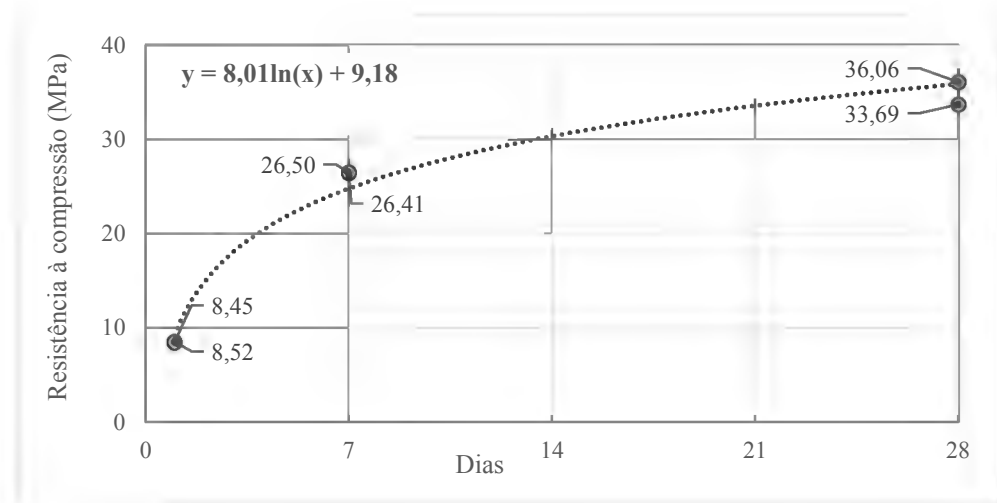
Figura 37 - Ruptura de corpo de prova de concreto



Fonte: O autor.

Foram rompidos 3 pares de corpos de prova, um a cada 1, 7 e 28 dias após a moldagem. A partir dos resultados dos 6 ensaios foi obtida a curva de evolução da resistência à compressão do concreto (Figura 38), cujo valor de resistência aos 28 dias foi de 35,87 MPa, atendendo ao critério definido.

Figura 38 - Evolução da resistência à compressão do concreto



Fonte: O autor.

3.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

3.2.1 Planejamento dos ensaios

O planejamento experimental desta pesquisa tem como foco os ensaios de cisalhamento direto, que foram divididos em dois grupos: ensaios em interface areia-concreto curado sob tensão e em areia pura. Primeiramente foram definidas as variáveis de resposta: a máxima tensão cisalhante durante o ensaio, denominada de pico, e a menor tensão cisalhante após a máxima, chamada de pós-pico. Além disso, foi calculada a normalização desses resultados através da tensão normal de cada ensaio, resultando no coeficiente de atrito.

A partir do ensaio de cisalhamento direto foram definidos parâmetros de processo (Tabela 12) e com base nestes foram designados os fatores controláveis do estudo, que representam as variáveis independentes: densidade relativa da areia (A), umidade da areia (B), tempo de endurecimento do concreto (C), tensão normal (D) e diâmetro médio dos grãos (E). Os parâmetros de velocidade de ensaio (F) e traço do concreto (G) foram considerados constantes, enquanto que nos ensaios de cisalhamento direto em areia as variáveis referentes ao concreto, tempo de endurecimento (C) e traço (G), não foram consideradas.

A escolha dos níveis de variação dos fatores controláveis ocorreu da seguinte forma: para a densidade relativa (A) se objetivou compreender os diversos níveis de compactação do solo; para a umidade (B) se buscou incluir o valor zero na análise (solo seco) e foi adotada a variação em 3%, o equivalente a uma mudança de 10% na saturação da areia, para melhor visualização da possível influência sobre a resposta; para o tempo de endurecimento do concreto (C) foi adotado o valor de 24 h como o máximo período viável para execução dos

ensaios, com o limite mínimo de 0 h, produzindo os níveis de variação a cada 6 h; para a tensão normal (D) se obteve como limite superior do equipamento a tensão de 180 kPa, em virtude da não utilização do braço de alavanca para diminuição dos ruídos, e se buscou considerar a tensão de 100 kPa como centro do conjunto de ensaios, devido a sua correspondência com as tensões horizontais a cerca de 10 m de profundidade em uma estaca escavada; e, por fim, a escolha do diâmetro médio dos grãos (E) se deu através dos motivos descritos no item 3.1.1.2.

Tabela 12 - Parâmetros de processo

Designação	Intervalo de Variação	Unidade
A: Densidade relativa da areia	10 a 90	%
B: Umidade da areia	0 a 12	%
C: Tempo de endurecimento do concreto	0 a 24	h
D: Tensão normal	20 a 180	kPa
E: Diâmetro médio dos grãos	0,60 e 1,10	mm
F: Velocidade de ensaio	0,14	mm/min
G: Traço do concreto	Tabela 10	-

Fonte: O autor.

A identificação de cada ensaio e corpo de prova foi feita através dos fatores controláveis, sendo utilizadas abreviaturas para sua designação: densidade relativa (DR), umidade (w), tempo de cura (t), tensão normal (S ou σ) e diâmetro médio dos grãos (D50). As respostas dos ensaios também seguiram essa lógica para a tensão cisalhante de pico (T_p ou τ_p) e a tensão cisalhante de pós-pico (T_{pp} ou τ_{pp}).

A presente pesquisa se baseia em uma análise quantitativa, portanto foram utilizados métodos estatísticos para obtenção dos resultados. Os métodos escolhidos foram fatorial cruzado e metodologia de superfície de resposta (RSM). Essa escolha permite a comparação dos resultados com a literatura, a identificação da influência das variáveis, a elaboração de superfícies que representam a resistência ao cisalhamento em função dos fatores controláveis e a comparação entre os resultados de ambos os métodos. Além disso, os ensaios de cada método foram planejados para se complementarem, diminuindo, assim, a quantidade de ensaios.

A primeira etapa experimental foi o método fatorial cruzado para o cisalhamento direto em interface. A Tabela 13 apresenta os fatores controláveis e os níveis de variação utilizados. Seu principal objetivo foi a realização de gráficos *boxplot*, que indicam, de forma geral, a dispersão de cada variável, bem como sua influência sobre o comportamento e o valor da resistência ao cisalhamento. Na sequência, obteve-se os parâmetros de resistência ao cisalhamento através de regressão linear para diferentes densidades relativas, umidades, tempos

de cura e diâmetros médios de grãos. A partir do número de níveis de variação dos fatores controláveis foi elaborada a matriz experimental, sendo executados 48 ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 13 - Fatores controláveis para o fatorial cruzado em interface

Fatores Controláveis	Número de níveis	Níveis reais	Unidades
A: Densidade relativa da areia	2	30 e 70	%
B: Umidade da areia	2	3 e 9	%
C: Tempo de endurecimento do concreto	2	6 e 18	h
D: Tensão normal	3	60, 100 e 140	kPa
E: Diâmetro médio dos grãos	2	0,60 e 1,10	mm

Fonte: O autor.

A metodologia de superfície de resposta para o cisalhamento direto em interface foi aplicada na segunda etapa experimental da pesquisa, através de um projeto central composto (CCD). Devido ao número de parâmetros, foram necessárias duas análises separadas, uma para cada amostra de areia, resultando em duas análises 2^4 . Conforme visto no item 2.4.1, o projeto CCD consiste de um fatorial $2k$ acrescido de n_F ensaios fatoriais, denominados axiais ou estrela, e n_C ensaios centrais. Para a parcela fatorial $2k$ de uma amostra, 16 ensaios, foram utilizados parte dos resultados da primeira etapa, com exceção dos resultados com nível de tensão normal de 100 kPa. Os ensaios estrela, 8 resultados, foram executados na combinação dos valores médios e extremos de cada variável. O valor de α foi 2, obtido através da Equação 21, que permite a rotabilidade do projeto. O número de pontos centrais adotados foi de 6. Desta forma, o número total de ensaios dessa etapa foi de 60, sendo 30 referentes à análise de cada diâmetro médio de grãos.

A Tabela 14 apresenta os fatores controláveis e os níveis de variação utilizados. O objetivo dessa análise foi a obtenção de superfícies que representem as tensões cisalhantes de pico e pós-pico em função da densidade relativa, umidade e tempo de cura do concreto para cada amostra. Ainda, com a Análise de Variância (ANOVA) foi possível obter a influência de cada fator na resposta, com melhor visualização na análise paramétrica das curvas.

Tabela 14 - Fatores controláveis para a RSM em interface

Fatores Controláveis	Número de níveis	Níveis reais	Unidades
A: Densidade relativa da areia	5	10, 30, 50, 70 e 90	%
B: Umidade da areia	5	0, 3, 6, 9 e 12	%
C: Tempo de endurecimento do concreto	5	0, 6, 12, 18 e 24	h
D: Tensão normal	5	20, 60, 100, 140 e 180	kPa

Fonte: O autor.

Para os ensaios em areia pura foram adotados os mesmos níveis de variação e objetivos dos cisalhamentos diretos em interface. Todavia, sem a presença da variável referente ao tempo de cura, as análises foram de uma ordem menor. Para o modelo fatorial cruzado, a matriz experimental resultou em 24 ensaios. No caso da RSM, foi utilizado de um projeto CCD de ordem 3 para cada amostra. A parcela fatorial 2k correspondeu a 8 ensaios, a estrela a 6 e os pontos centrais também a 6. O valor de α foi mantido em 2, com o intuito de permitir uma melhor comparação com os ensaios em interface, apesar da perda de rotabilidade, pois através da Equação 21 o valor seria $\sqrt{3}$. Assim, a análise de cada amostra foi composta por 20 ensaios, totalizando 40.

Portanto, de forma geral, a campanha de ensaios de cisalhamento direto da presente pesquisa compreendeu 76 ensaios em interface e 48 em areia, além de repetições dos ensaios que apresentaram comportamento divergente aos seus pares.

3.2.2 Metodologia de execução dos ensaios

Os procedimentos do ensaio foram os estabelecidos pela ASTM D3080 (2011). Essa norma apresenta a limitação de que o diâmetro do grão seja menor do que um décimo do lado da amostra ensaiada, assim, o conjunto cisalhante escolhido foi quadrado, com aproximadamente 100 mm de aresta.

Para os ensaios de cisalhamento direto foi necessária a preparação dos materiais. Previamente se realizou o encapamento com plástico filme dos moldes de alumínio utilizados para o concreto, com o intuito de facilitar a retirada dos corpos de prova após o término do ensaio. As amostras de areia foram primeiramente secas em estufa a 105 °C, de forma a evitar variações nos resultados devido à umidade inicial, sendo separados 400 g de areia para adição de água até o atingimento da umidade desejada para o respectivo ensaio. Dessa areia úmida era separada a massa a ser utilizada no ensaio, com um acréscimo de 5 g visando compensar as perdas na compactação, e da sobra de material retiradas 3 cápsulas para conferência da umidade.

A placa de concreto foi preparada a partir do traço proposto por Nienov (2016), apresentado na Tabela 10. A mistura ocorreu de forma manual, com a produção de uma placa por vez, sendo primeiramente pesados todos os materiais e misturados na seguinte ordem: cimento, areia, brita, água e aditivo. Após a preparação do concreto, ele era depositado por gravidade no molde com auxílio de uma espátula para eliminação dos vazios e melhor preenchimento. Por fim, sua superfície era alisada, de forma que a única rugosidade fosse

proveniente da impressão da areia sobre o corpo de prova. Na Figura 39a é apresentado um corpo de prova de concreto recém moldado.

A areia, por sua vez, foi compactada dentro de um anel com um filtro (Figura 39b), de forma que pudesse ser transportada com segurança até a balança para aferição da massa de areia no molde, utilizada posteriormente para o cálculo do índice de vazios e da densidade relativa. Na sequência, o molde do concreto era depositado na caixa inferior do conjunto (Figura 39c), enquanto a areia era extraída do molde e colocada na caixa superior (Figura 39d). A extração da areia ocorria da seguinte forma: o molde era colocado sobre o conjunto já montado, retirava-se o filtro da base e a amostra era levemente empurrada para baixo com o auxílio da tampa do conjunto, que finalizava o processo de montagem. A duração total da preparação de cada amostra era de aproximadamente 40 minutos.

Após a colocação do conjunto no equipamento era aplicada a tensão normal, por meio de anilhas de metal, correspondente ao ensaio (Figura 39e). O período de estabilização dos deslocamentos verticais era equivalente ao tempo de cura do concreto, variando, portanto, para cada ensaio. Após o término dessa etapa, era adicionada uma abertura (*gap*) de 0,30 mm entre as duas partes do conjunto, com o intuito de evitar quebra de grãos durante o cisalhamento.

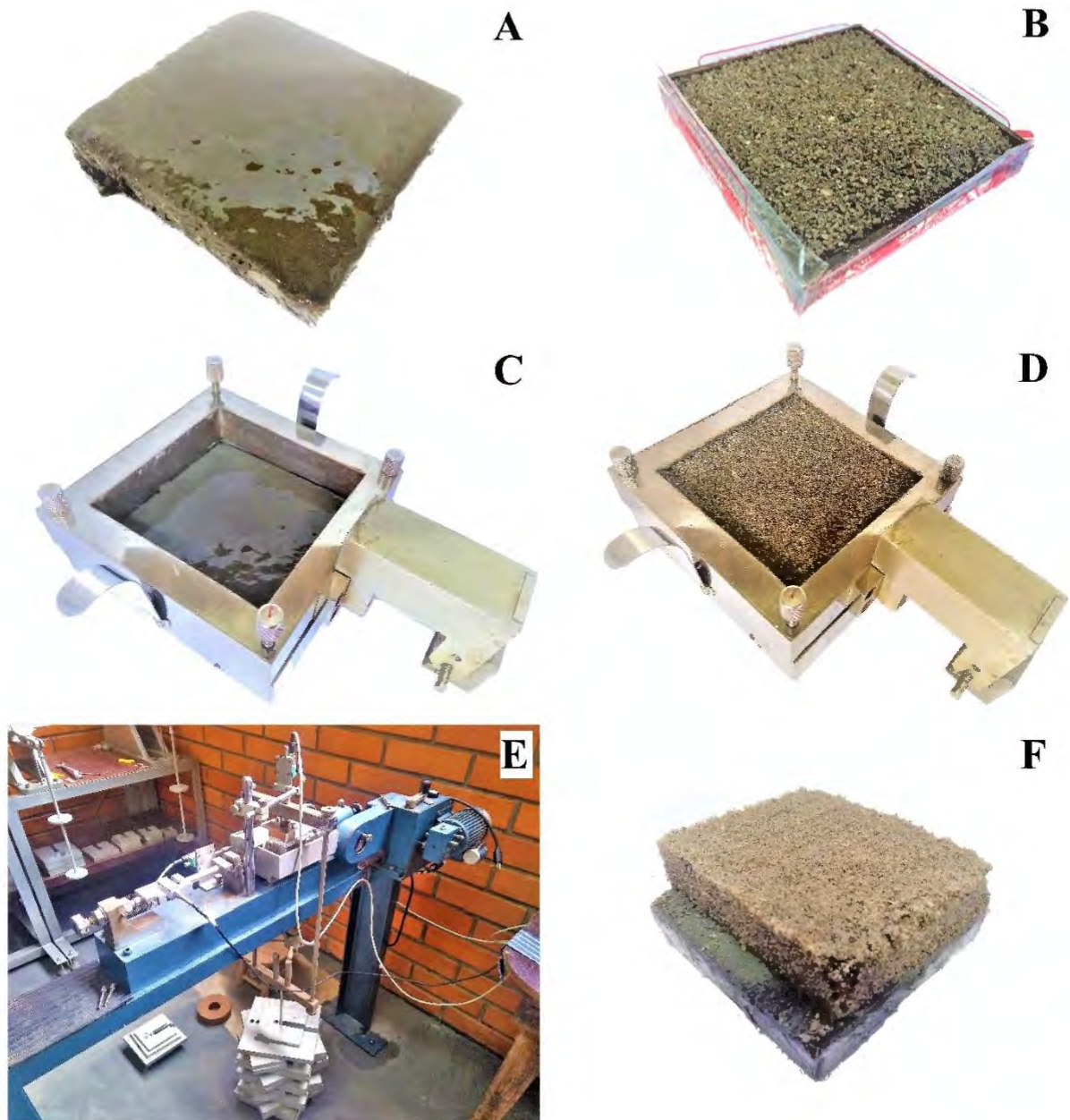
A etapa seguinte correspondia ao cisalhamento, cuja velocidade era obtida por um sistema de engrenagens do equipamento. Sua determinação é dada através da Equação 24, na qual a ruptura foi considerada com um deslocamento de pelo menos 10% da aresta da amostra (10 mm), para um tempo adotado (t_f) de 90 minutos de ensaio. A velocidade de ensaio (d_r) do equipamento que mais se aproximava do almejado era de 0,14 mm/min, o que resulta em um deslocamento máximo (d_f) de cerca de 12 mm. Ao final do ensaio, a amostra rompida (Figura 39f) era retirada do conjunto e da porção de areia eram separadas 3 cápsulas para a determinação da umidade final do corpo de prova.

$$d_r = \frac{d_f}{t_f} \quad (24)$$

O procedimento descrito anteriormente trata dos ensaios de interface, contudo, também foram realizados ensaios de cisalhamento apenas em areia. Nesse caso, eram separados 900 g de areia seca em estufa para posteriormente realização do acréscimo de umidade, pois a moldagem da areia ocorria dentro do próprio conjunto completo de cisalhamento. Nessa situação também foi utilizado um acréscimo de 5 g na massa úmida devido às perdas e retiradas 3 cápsulas da areia úmida da sobra para determinação da umidade. Após a moldagem o conjunto

total era pesado para verificação da massa de areia obtida. Outra mudança se dá no tempo de estabilização dos deslocamentos verticais, o qual foi adotado como 30 minutos. As etapas seguintes, por sua vez, seguiram os mesmos processos já descritos para os ensaios em interface.

Figura 39 - Procedimento de execução do ensaio de cisalhamento direto em interface

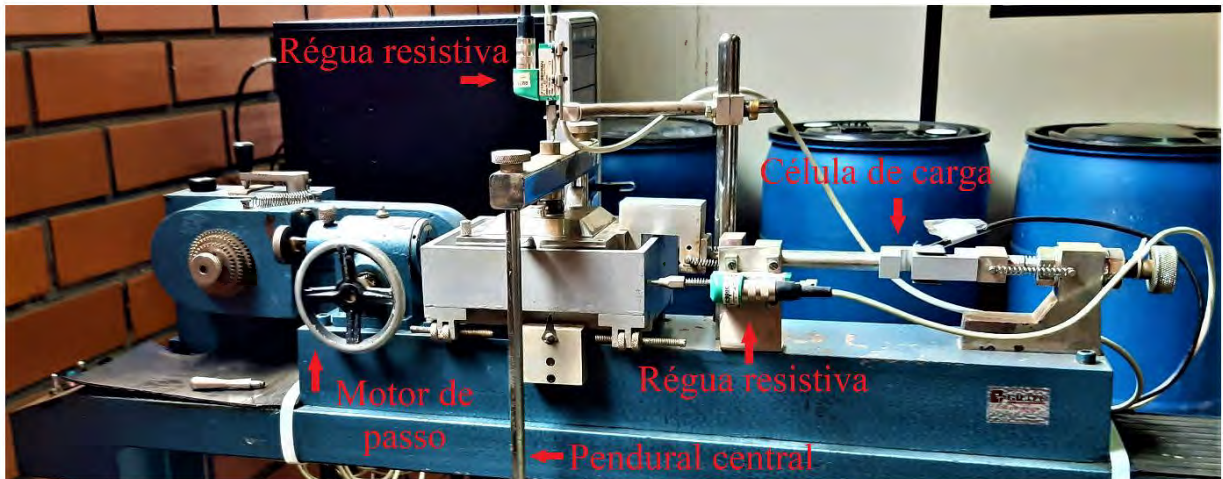


Fonte: O autor.

A aquisição dos dados foi feita de forma automatizada, sendo as medidas de deslocamento obtidas por meio de régua resistivas, enquanto a força horizontal era computada através de uma célula de carga tipo S, com capacidade máxima de 2000 kg. A frequência de aquisição de dados era de 1,25 Hz, com a saída das leituras em *bits*, sendo posteriormente

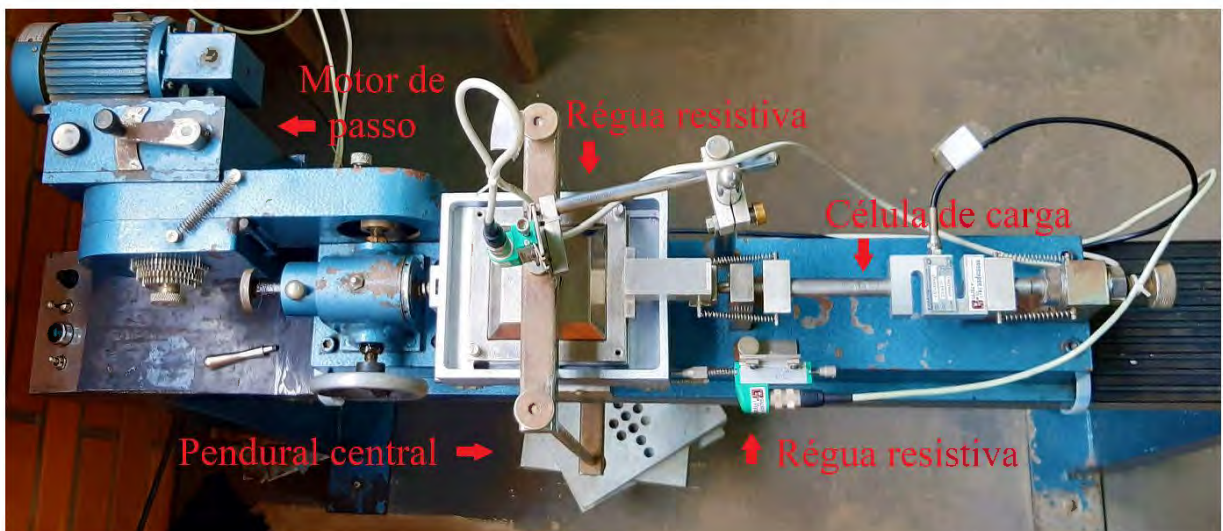
convertidas nos seus respectivos valores e unidades via calibração do equipamento. Na Figura 40 é apresentada a vista lateral da máquina do ensaio de cisalhamento direto, enquanto que na Figura 41 a vista superior do equipamento, com a indicação de seus principais componentes.

Figura 40 - Vista lateral do equipamento de cisalhamento direto



Fonte: O autor.

Figura 41 - Vista superior do equipamento de cisalhamento direto



Fonte: O autor.

3.3 ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

3.3.1 Planejamento dos ensaios

Outro objetivo desta pesquisa foi a medição da rugosidade dos corpos de prova de concreto curados sob tensão e impressos com areia. Buscou-se analisar, ainda, se os parâmetros relacionados à resistência ao cisalhamento (Tabela 10) teriam alguma influência sobre as respostas de rugosidade. A partir desses parâmetros foram definidos os fatores controláveis do

estudo, que representam as variáveis independentes: diâmetro médio dos grãos, tensão normal, densidade relativa e umidade da areia. Os parâmetros de tempo de endurecimento e traço do concreto foram considerados constantes, enquanto que a velocidade de ensaio não foi considerada. Padronizou-se o tempo de cura em 24 horas devido a sua não influência no perfil de rugosidade, já que a impressão da areia sobre o concreto fresco acontecia nos primeiros minutos. Contudo, o tempo maior foi considerado para que fosse preservada a impressão durante a desforma e limpeza do excesso de areia, pois após 24 horas o concreto já apresentaria uma maior rigidez ao ser retirado do conjunto.

O perfil de rugosidade da superfície possibilita obter diversas respostas, contudo, neste estudo foram selecionados a rugosidade média (R_a), a rugosidade máxima (R_{max}) e a rugosidade máxima média (R^*_{max}). De posse das rugosidades máximas foi possível obter também a rugosidade normalizada, essencial para comparação com outros autores.

Devido às limitações experimentais de quantidade de ensaios, a análise foi feita de forma separada para as variáveis, utilizando-se dois métodos estatísticos: fatorial cruzado e fatorial 2k (ordem 3). Ainda, há uma complementação entre os ensaios de cada método, diminuindo ainda mais a quantidade de ensaios. Foram moldados 16 corpos de prova, sendo 10 para a etapa de fatorial cruzado e 8 para de fatorial 2k.

Através do método fatorial cruzado se buscou avaliar apenas a influência do diâmetro dos grãos e da tensão normal aplicada, portanto, padronizou-se a densidade relativa como 70% e a umidade como 9%. Essa escolha ocorreu devido à ampla utilização desses valores nas análises envolvendo à resistência ao cisalhamento e à menor dispersão dos resultados de cisalhamento direto para esses fatores. A Tabela 15 apresenta os fatores controláveis e os níveis de variação utilizados.

Tabela 15 - Fatores controláveis para o fatorial cruzado

Fatores Controláveis	Número de níveis	Níveis reais	Unidades
A: Diâmetro médio dos grãos	2	0,60 e 1,10	mm
B: Tensão normal	5	20, 60, 100, 140 e 180	kPa
C: Densidade relativa da areia	1	70	%
D: Umidade da areia	1	9	%
E: Tempo de endurecimento do concreto	1	24	h

Fonte: O autor.

Com o método fatorial 2k o objetivo foi avaliar o efeito do diâmetro dos grãos, da densidade relativa e da umidade em diferentes corpos de prova impressos com a mesma tensão

normal de 100 kPa, que representaria um valor intermediário. Os fatores controláveis e níveis de variação utilizados são encontrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Fatores controláveis para o fatorial 2k

Fatores Controláveis	Número de níveis	Níveis reais	Unidades
A: Diâmetro médio dos grãos	2	0,60 e 1,10	mm
B: Densidade relativa da areia	2	30 e 70	%
C: Umidade da areia	2	3 e 9	%
D: Tensão normal	1	100	kPa
E: Tempo de endurecimento do concreto	1	24	h

Fonte: O autor.

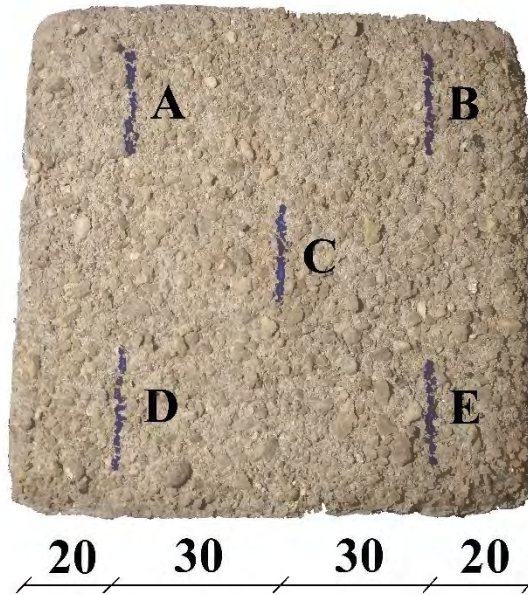
3.3.2 Metodologia de execução dos ensaios

Para a preparação dos materiais foram utilizados os mesmos procedimentos descritos para os ensaios de cisalhamento direto em interface. Contudo, após a colocação do conjunto no equipamento foi aplicada à tensão normal correspondente ao ensaio e aguardado um período de estabilização dos deslocamentos verticais de 24 horas. Durante esse tempo foi feita a coleta de dados referentes ao deslocamento vertical da areia por meio da régua resistiva. Ao término dessa etapa o corpo de prova era retirado do conjunto, desformado e aliviado do excesso de areia por meio de sopro e pincel. Por fim, o corpo de prova era identificado e embalado para prosseguimento dos ensaios.

Devido à elevada área da superfície do corpo de prova, de 100x100 mm, optou-se por realizar 5 leituras de 25 mm de comprimento por placa de concreto curado sob tensão, em diferentes posições, conforme indicado na Figura 42. A escolha dessa distribuição teve como objetivo o mapeamento de diferentes pontos da superfície, como o centro e as laterais. A direção e sentido das leituras foram os mesmos do ensaio de cisalhamento direto.

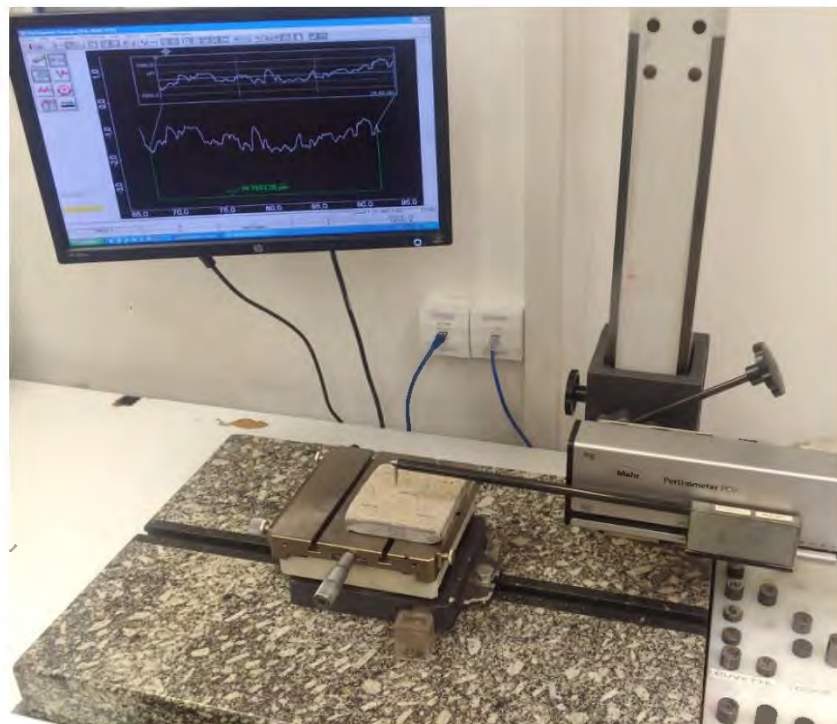
Para a medição da superfície foi utilizado um perfilômetro PCV da marca Mahr (Figura 43), com velocidade de ensaio de 0,2 mm/s. Essas medições forneceram o perfil primário de cada leitura, portanto, foi necessária a filtragem da curva para obtenção do perfil de rugosidade. Nessa etapa foi utilizado um *software* de metrologia de superfícies para aplicação de um filtro gaussiano, com um *cut-off* de 2,5 mm, que resultou em perfis de rugosidade com 20 mm de comprimento. Por fim, a partir desses perfis foram extraídos os parâmetros Ra, Rmax, R*max e, através deles, a rugosidade normalizada (Rn e R*n), totalizando 5 valores de cada resposta por corpo de prova.

Figura 42 - Localização das leituras de rugosidade (escala em mm)



Fonte: O autor.

Figura 43 - Perfilômetro PCV Mahr



Fonte: O autor.

3.4 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA

3.4.1 Planejamento dos ensaios

O presente estudo também observou como ocorria a superfície de ruptura durante o ensaio de cisalhamento direto, com o intuito de compreender a interação entre as partículas.

Para isso, primeiramente se buscou determinar se havia algum deslocamento vertical da areia sobre o concreto através da comparação entre o deslocamento máximo ocorrido em ensaios de areia pura e de interface. Para minimizar a quantidade de experimentos, optou-se por utilizar as medidas de deslocamento vertical já disponíveis da etapa fatorial cruzado dos ensaios de medição de rugosidade, cujos fatores controláveis e níveis de variação foram indicados na Tabela 15. Para comparação com esses resultados de interface, foram necessários executar apenas mais 10 medições de deslocamento vertical em areia pura, para os mesmos valores das variáveis adotadas.

Outro ensaio planejado para auxiliar na determinação da superfície de ruptura ocorreu através do cisalhamento direto, cujos fatores controláveis e níveis reais podem ser vistos na Tabela 17. Nesse ensaio se procurou reduzir a altura do nível de concreto dentro do molde, de modo que a ruptura acontecesse entre a areia pura e uma camada de areia em contato com o concreto fresco. Essa redução foi adotada em 2 mm, praticamente o dobro do diâmetro médio dos grãos utilizados no ensaio, garantindo a superfície areia-areia. Além disso, como o tempo de cura do concreto poderia modificar essa camada de areia, adotou-se os níveis de 0 e 15 h, devido à sua possibilidade de execução e distanciamento dos valores.

Tabela 17 - Fatores controláveis para a determinação da superfície de ruptura

Fatores Controláveis	Número de níveis	Níveis reais	Unidades
A: Tempo de endurecimento do concreto	2	0 e 15	h
B: Nível do concreto	2	-2 e 0	mm
C: Diâmetro médio dos grãos	1	1,10	mm
D: Densidade relativa	1	70	%
E: Umidade da areia	1	9	%
F: Tensão normal	1	100	kPa

Fonte: O autor.

3.4.2 Metodologia de execução dos ensaios

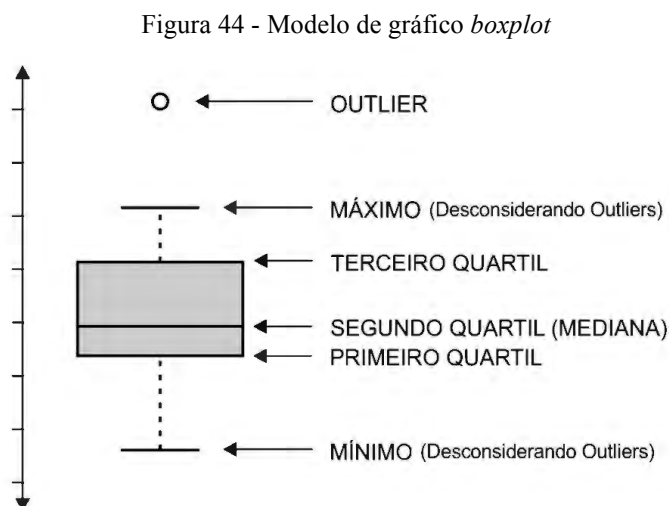
Para a avaliação do deslocamento vertical do concreto curado sob tensão, os ensaios de interface foram os mesmos dos testes de medição de rugosidade, portanto, com os procedimentos descritos no item 3.3.2. Para os ensaios de areia, contudo, as amostras foram compactadas dentro de um anel com um filtro, de forma que pudesse ser transportada com segurança até a balança, para aferição da massa e, conseqüentemente, do índice de vazios obtido. Na sequência, a amostra era levada até o conjunto de cisalhamento direto, no qual havia um espaçador de metal para completar a altura da caixa. A areia era então extraída do molde e colocada na caixa superior. Após a colocação do conjunto no equipamento era aplicada à tensão

normal correspondente ao ensaio. Na sequência era dado início ao período de estabilização dos deslocamentos verticais, com duração de 15 minutos, no qual se captavam as leituras à uma frequência de 1,25 Hz. Ao término desse processo, o conjunto era desmontado e então retiradas 3 cápsulas para medição da umidade final do ensaio.

Com relação a execução dos ensaios de determinação da superfície de ruptura, os procedimentos foram praticamente os mesmos descritos para os ensaios de cisalhamento direto, no item 3.2.2. A única diferença ocorria durante a etapa de moldagem do corpo de prova de concreto, para o qual foi medida a distância de 2 mm a não ser preenchida no topo da caixa metálica nos casos referentes a essa variação.

3.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

De posse dos resultados experimentais, foram utilizadas diversas ferramentas estatísticas para análise dos dados. Para visualizar a dispersão e *outliers* dos parâmetros sem a necessidade de supor uma distribuição estatística, foram utilizados os gráficos de caixa (*boxplot*), exemplificado na Figura 44. A “caixa” é formada pelo primeiro e terceiro quartis (faixa entre 25 e 75%). Dentro desse intervalo são encontrados a linha da mediana e o ponto que indica a média. Além desses valores se encontra o intervalo interquartil, correspondente a diferença entre o primeiro e terceiro quartis. Os *outliers* são definidos quando se encontram fora do intervalo interquartil.



Fonte: Oliveira (2019).

Para análises mais avançadas foi realizada a ANOVA através de um *software* estatístico, cujo formato foi exemplificado na Tabela 5. Essa ferramenta é utilizada na determinação da significância de cada parâmetro e do próprio modelo, cuja verificação é feita através do valor-

p, que mostra a chance de a variação ter ocorrido apenas devido ao ruído. Os valores-p inferiores a 0,05 indicam quais os termos do modelo são significativos. Esse valor é definido a partir do intervalo de confiança de 95%, que infere que a probabilidade de erro é inferior a 5%. Portanto, além da comparação básica com o critério de significância, o valor-p indica quais variáveis mais influenciam na resposta, sendo que valores superiores a 0,10 indicam os termos do modelo que não são significativos.

Por fim, também foram utilizadas análises de regressão, via *software*, para construção de modelos matemáticos. A regressão linear foi usada na determinação dos parâmetros de resistência da interface e do solo, enquanto a quadrática foi necessária na elaboração das superfícies de resposta advindas da RSM.

3.6 AVALIAÇÃO DOS RUÍDOS NOS ENSAIOS

Conhecendo-se os parâmetros de processo é possível realizar a avaliação dos causadores de ruído nos experimentos, que tem como principal objetivo identificar as incertezas envolvidas no estudo. Nesta pesquisa as maiores fontes de ruído provenientes dos ensaios de laboratório são a padronização das amostras e problemas do equipamento de cisalhamento direto.

Com relação as amostras, podem ocorrer variações decorrentes da compactação da areia e da moldagem do corpo de prova de concreto. Especial cuidado foi tomado na verificação da massa de areia colocada na caixa de cisalhamento e no acabamento da superfície do concreto. Além disso, todos os experimentos foram executados em ordem aleatória, evitando conclusões errôneas causadas por distúrbios presentes em apenas um período de estudo.

Os problemas no equipamento de cisalhamento direto, por outro lado, causam as maiores discrepâncias no ensaio. Elas podem advir de desnível na caixa, descalibração das células de carga e régua resistivas e colisões contra o equipamento. Uma das causas de desnível na caixa foi identificada na utilização do braço de alavanca do equipamento de cisalhamento, portanto, optou-se por utilizar apenas o pendural central para disposição das massas que geram a tensão normal do ensaio. Com relação as calibrações dos equipamentos, essas foram refeitas antes de cada etapa da campanha experimental, bem como ensaios-testes para avaliar a coerência dos valores obtidos.

Como alternativa a esses ruídos, foi adotada a repetição dos ensaios que apresentaram qualquer comportamento não coerente com a literatura e outros testes. Esse procedimento também ocorreu para os ensaios em que foram identificados qualquer um dos erros mencionados neste item, de forma a garantir a validade dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados neste trabalho foram divididos em quatro grupos: resistência ao cisalhamento em interface entre areia e concreto curado sob tensão e em areia pura, rugosidade da superfície dos corpos de prova de concreto curados sob tensão, provável superfície de cisalhamento e comparação com a literatura.

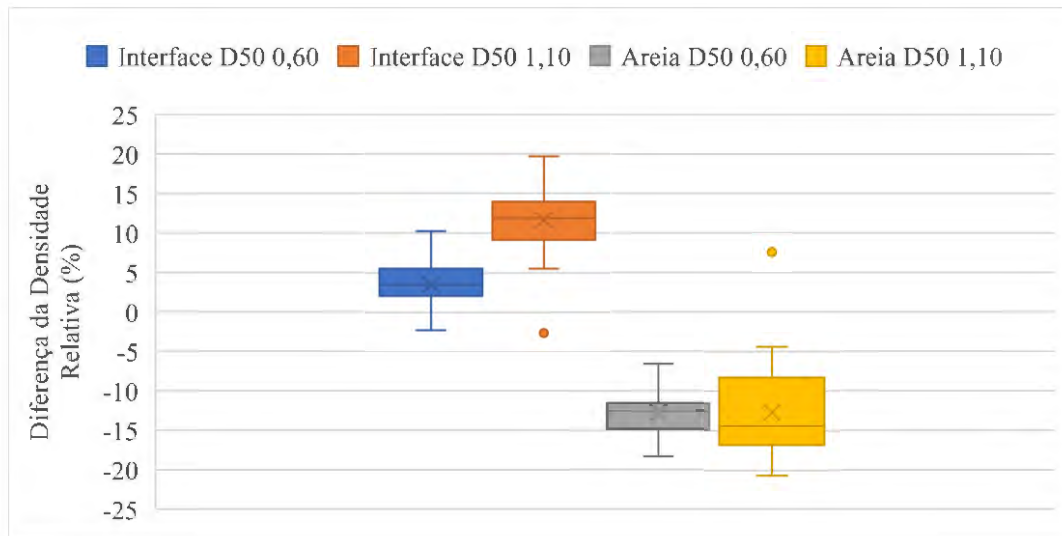
4.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

4.1.1 Análise geral dos resultados

Conforme descrito no item 3.2.1, foram realizados 76 ensaios de cisalhamento em interface e 48 em areia. Os resultados desses ensaios estão dispostos nos apêndices deste trabalho. No Apêndice 1 constam as curvas de deslocamento vertical x raiz do tempo, deslocamento vertical x deslocamento horizontal, tensão cisalhante x deslocamento horizontal e coeficiente de atrito x deslocamento horizontal. Já no Apêndice 2 são apresentadas diversas tabelas com o resumo dos valores medidos em cada ensaio, sendo eles a densidade relativa inicial (DR_0), a umidade inicial (w_0), a umidade final (w_f), a tensão cisalhante de pico (τ_p), a tensão cisalhante de pós-pico (τ_{pp}), o coeficiente de atrito de pico $[(\tau/\sigma)_p]$, o coeficiente de atrito de pós-pico $[(\tau/\sigma)_{pp}]$, o deslocamento horizontal até o pico (d_p) e o deslocamento até o pós-pico (d_{pp}). Além disso, foram calculadas as diferenças entre a densidade relativa proposta e a obtida (ΔDR), entre a umidade planejada e a real (Δw) e entre a umidade final e a inicial do ensaio ($w_f - w_0$).

Os primeiros resultados a serem analisados são as diferenças na densidade relativa na qual foi moldada a areia em cada ensaio, apresentadas de forma gráfica na Figura 45. Primeiramente, nota-se uma variação positiva para as amostras de interface e negativa para as de areia, ou seja, nos ensaios de interface ocorreu uma maior densidade relativa que a planejada, enquanto nos de areia o inverso. Uma explicação para essa ocorrência é a perda de material durante o processo de moldagem. Segundo o item 3.2, foi adotado um acréscimo de 5 g na massa de areia úmida calculada tanto para os ensaios de interface quanto para os de areia pura. Contudo, para esse último caso a massa total de areia úmida utilizada era cerca do dobro do que nos ensaios de interface, resultando, provavelmente, em maior perda de material. Com relação à magnitude da diferença, percebe-se que os valores máximos ficaram em torno de 20%, entretanto, a sua correspondência em massa de areia, através do índice de vazios e umidade, é de cerca de 2g, devido à pequena variação dos índices de vazios máximo e mínimo.

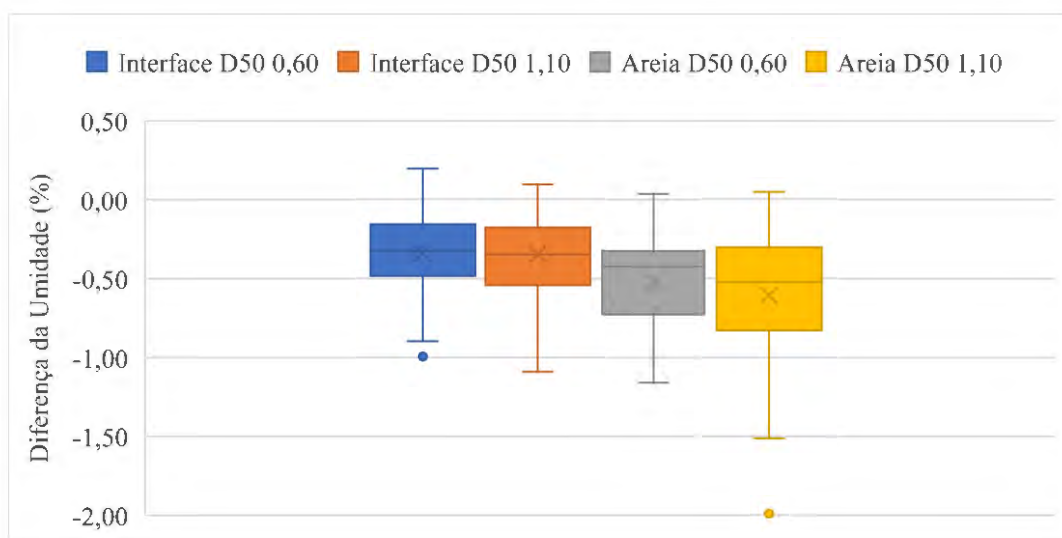
Figura 45 - Diferença entre densidade relativa real e calculada



Fonte: O autor.

Outro fator com influência na densidade relativa, através do índice de vazios natural, é a própria umidade inicial da areia, conferida através de 3 cápsulas durante a preparação dos materiais. Na Figura 46 é mostrada a diferença entre os valores calculados e os medidos. Nessa análise não se nota grande variação entre os casos, com uma diferença média de umidade de cerca de -0,5%, enquanto a máxima de 2% foi um *outlier*. A provável causa dessa variação é a perda de umidade durante o processo de homogeneização da areia úmida. Apesar das diferenças observadas para densidade relativa e umidade, foram utilizados os valores de projeto nas análises, e não os reais, em virtude de os níveis estatísticos adotados serem fixos.

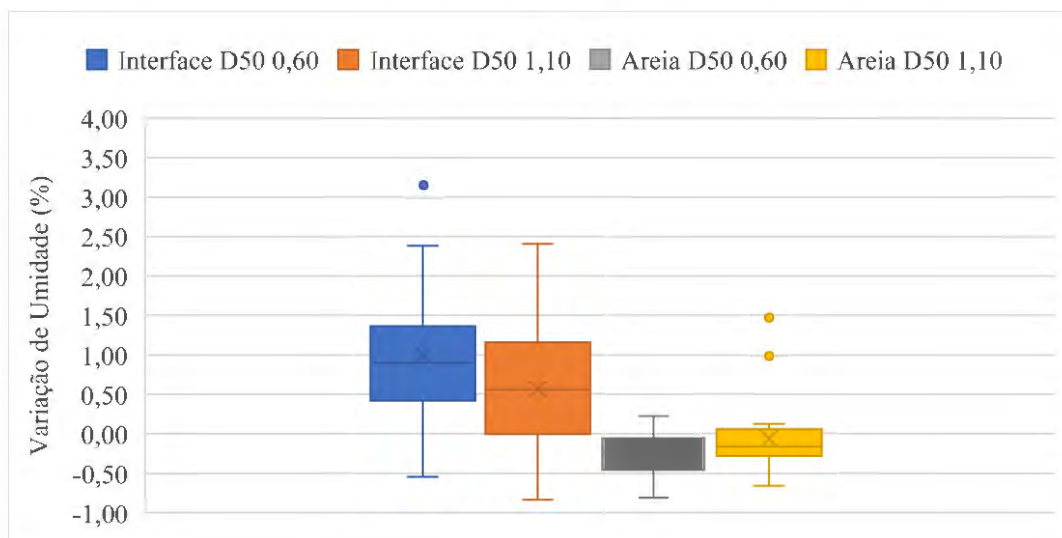
Figura 46 - Diferença entre umidade relativa real e calculada



Fonte: O autor.

Também ocorre a variação da porcentagem de água na areia durante o ensaio, obtida através da diferença entre a umidade final e inicial. Na Figura 47 se nota um comportamento de acréscimo médio de umidade de cerca de 0,75% nos ensaios de interface, enquanto que para os ensaios em areia ocorreu um decréscimo por volta de 0,25%. Essa diferença pode indicar que nos ensaios de interface ocorreu uma passagem da água presente no concreto curado sob tensão para a massa de areia.

Figura 47 - Variação de umidade durante o ensaio



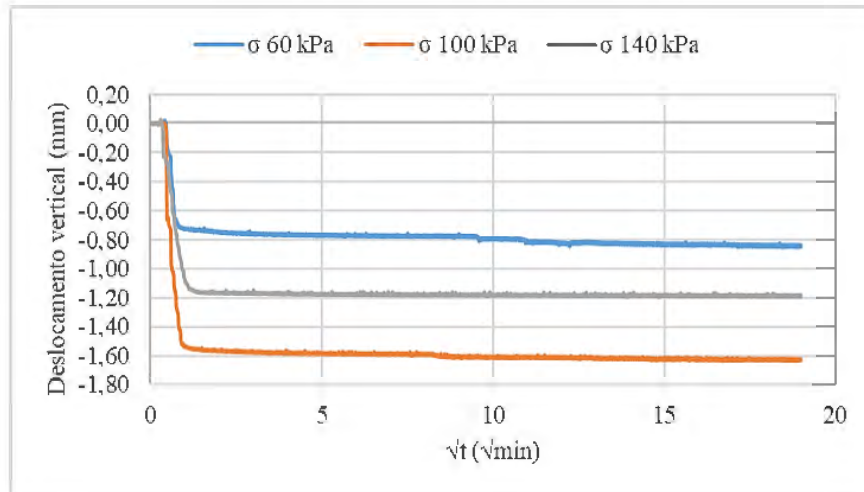
Fonte: O autor.

Seguindo para a análise das curvas provenientes do cisalhamento direto, foram escolhidos dois conjuntos de ensaios de interface que exemplificam as diversas variações encontradas: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 6h e D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h. Primeiramente são analisados os gráficos de deslocamento vertical, sendo a Figura 48 referente ao exemplo de areia média (D50 0,60 mm) e a Figura 49 de areia grossa (D50 1,10 mm). Para o caso da Figura 49 se nota o comportamento esperado para o solo, ou seja, maiores deslocamentos verticais com o acréscimo de tensão normal. Contudo, em diversos ensaios ocorreu o exemplificado pela Figura 48, no qual a tensão intermediária gerou maiores deslocamentos verticais que a tensão superior. Esse comportamento foi considerado um erro na montagem do ensaio, cuja causa pode estar relacionada aos espaços deixados entre a tampa e a amostra de areia, que não conseguiram ser eliminados apenas com a aplicação do peso do pendural central (por volta de 7 kg). Ressalva-se, ainda, que no caso Figura 48 a diferença entre o valor esperado e o obtido para a tensão de 100 kPa foi de cerca de 0,5 mm.

Com relação ao comportamento das curvas tensão x deslocamento, apresentada na Figura 50 para o caso D50 0,60 mm e na Figura 51 para o D50 1,10 mm, nota-se que o

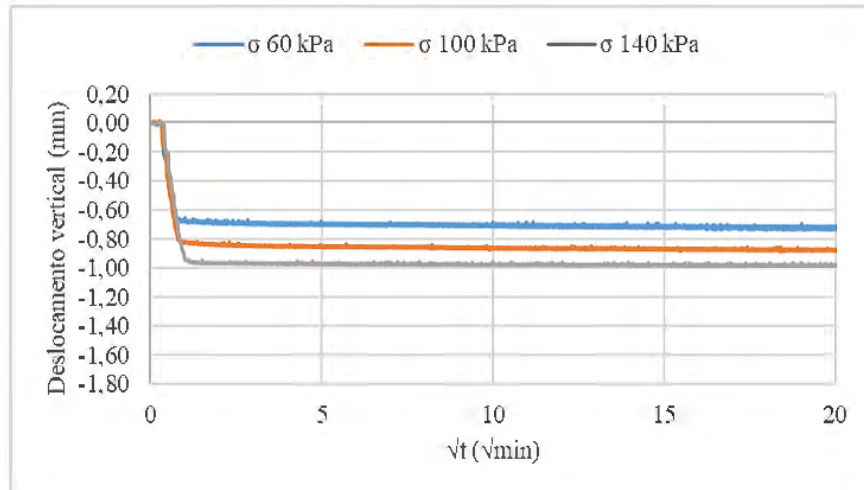
espaçamento vertical entre todos os ensaios foi coerente, levando em conta as tensões normais escolhidas. Além disso, para o caso da Figura 50, com densidade relativa de 30%, percebe-se um comportamento de endurecimento (*hardening*), enquanto que para a Figura 51, com densidade relativa de 70%, o comportamento é de amolecimento (*softening*).

Figura 48 - Deslocamento vertical: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 6h



Fonte: O autor.

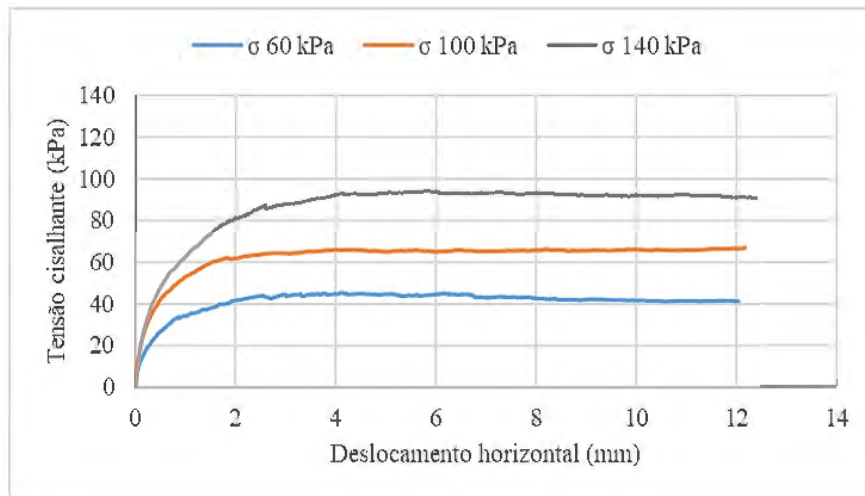
Figura 49 - Deslocamento vertical: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h



Fonte: O autor.

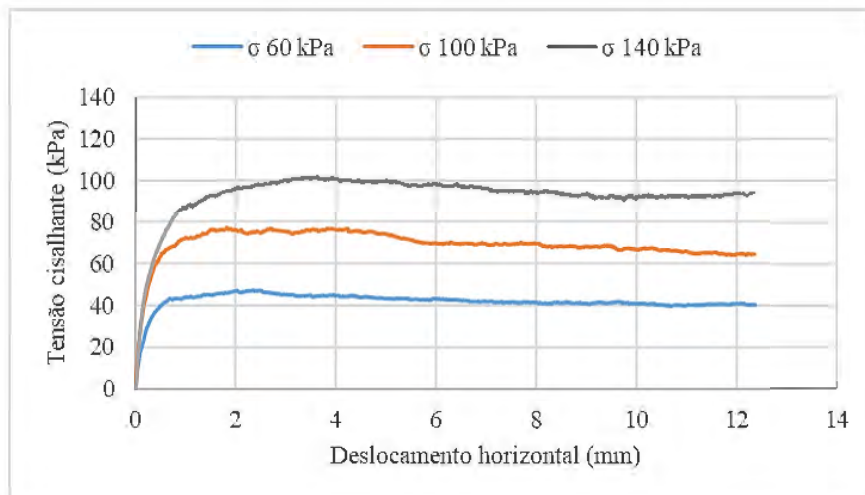
Ainda com relação as curvas tensão x deslocamento, foram elaborados os gráficos com o coeficiente de atrito, mostrados na Figura 52 para a areia média e na Figura 53 para a grossa. O destaque dessa análise é de que as curvas com a menor tensão normal apresentam valores superiores às outras. Isso indica que um alinhamento dos resultados dos 3 ensaios não depende apenas da tensão normal, sendo necessário um intercepto, como será abordado em itens subsequentes.

Figura 50 - Tensão cisalhante: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 6h



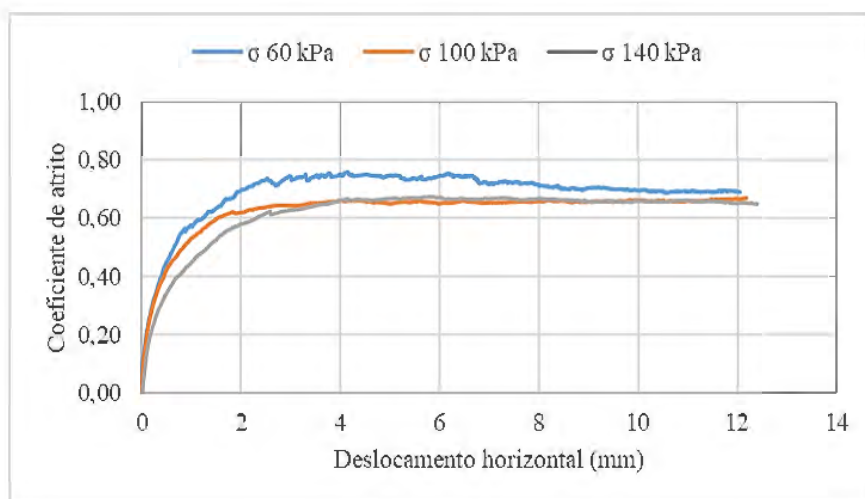
Fonte: O autor.

Figura 51 - Tensão cisalhante: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h



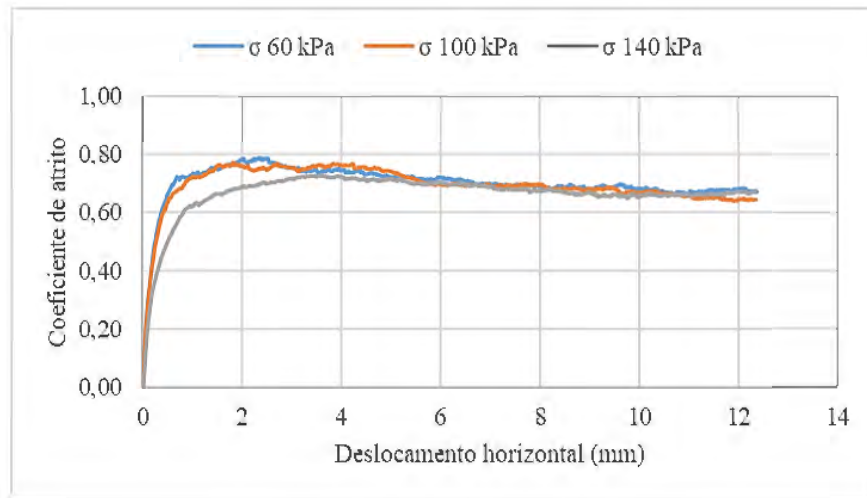
Fonte: O autor.

Figura 52 - Coeficiente de atrito: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 6h



Fonte: O autor.

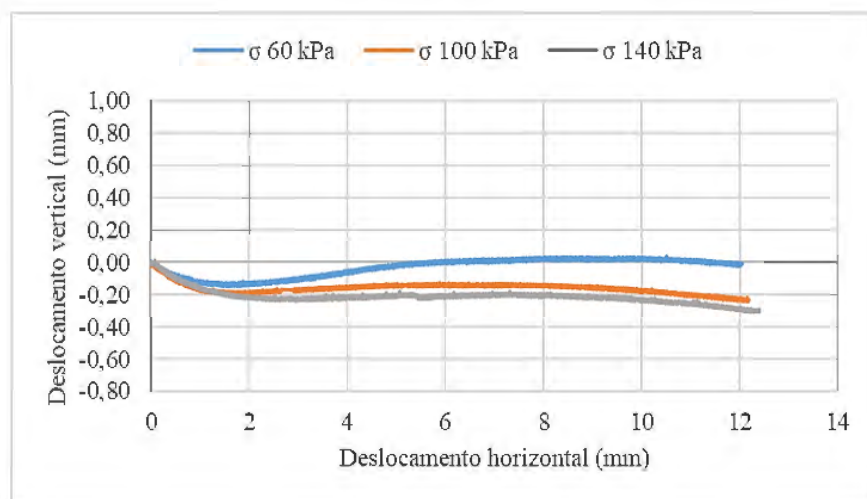
Figura 53 - Coeficiente de atrito: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h



Fonte: O autor.

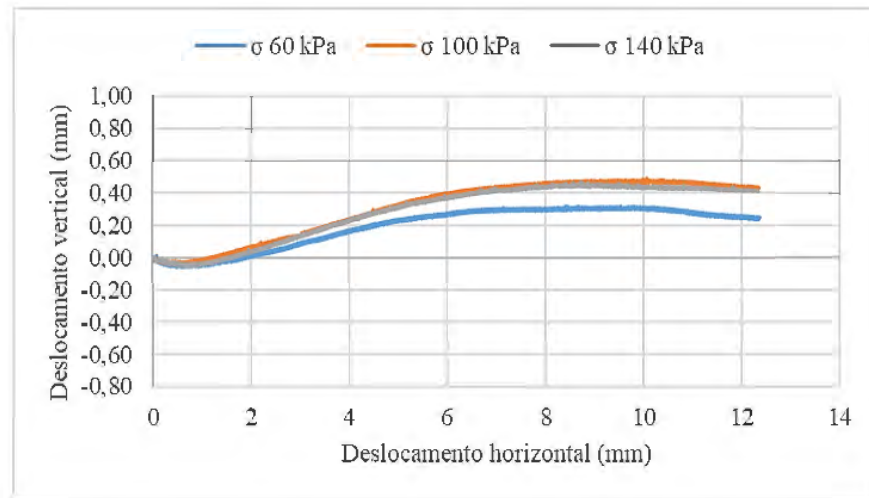
O último gráfico gerado através do ensaio de cisalhamento direto é o de deslocamento vertical x deslocamento horizontal, como apresentado na Figura 54 para a areia de D50 0,60 mm e na Figura 55 para a de D50 1,10 mm. Através dessas curvas é possível visualizar o comportamento de compactação para o caso da Figura 54, com densidade relativa de 30%, concordando o *hardening* definido pela curva tensão x deslocamento. Já na Figura 55, devido à amostra apresentar uma densidade relativa de 70%, o comportamento definido é de dilatância, indicando o *softening*.

Figura 54 - Deslocamento vertical: D50 0,60 mm- DR 30% - w 3% - t 6h



Fonte: O autor.

Figura 55 - Deslocamento vertical: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h

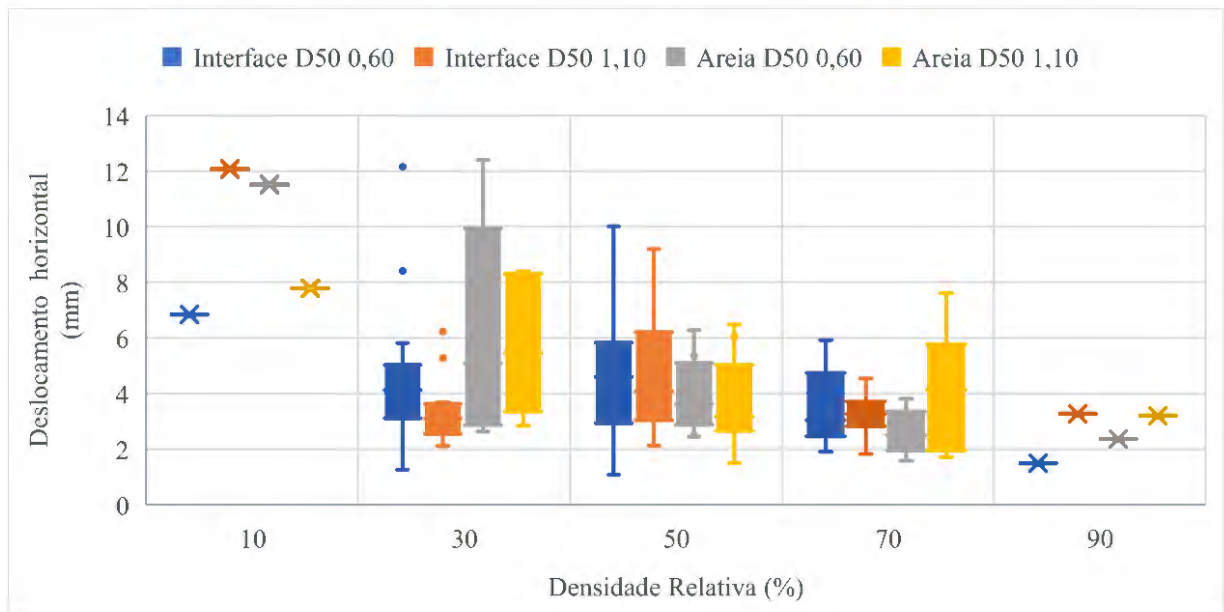


Fonte: O autor.

É possível, ainda, analisar de forma geral o deslocamento necessário para obtenção das tensões cisalhantes de pico e de pós-pico. Na Figura 56 é apresentado um gráfico de deslocamento horizontal x densidade relativa para a posição da tensão de pico, enquanto na Figura 57 a da tensão de pós-pico. Na análise da Figura 56 se percebe um comportamento divergente entre os ensaios de interface e de areia para a densidade relativa de 30%. A causa dessa discrepância pode estar relacionada a variação da densidade relativa real, vista na Figura 45, que possuía valores superiores para os ensaios de interface e inferiores para os de areia, podendo gerar comportamentos diferentes para as curvas. Dessa forma, os ensaios de interface planejados com DR 30% estariam mais compactados, com comportamento de *softening*, enquanto os ensaios em areia estariam mais fofos, com comportamento de *hardening*. Nota-se a presença de alguns *outliers* e grandes intervalos de dispersão, cuja provável razão está em pequenos ruídos na curva tensão x deslocamento, pois, no presente estudo, apenas o maior valor foi selecionado, independentemente de sua posição. Com relação aos valores de deslocamento até o pico, esses variaram em função da tensão normal, mas com maior concentração entre 2 e 4 mm. Para as tensões pós-pico, na Figura 57, percebe-se um comportamento mais homogêneo e coerente com sua definição, com os valores localizados próximos ao final do ensaio, entre 9 e 12 mm.

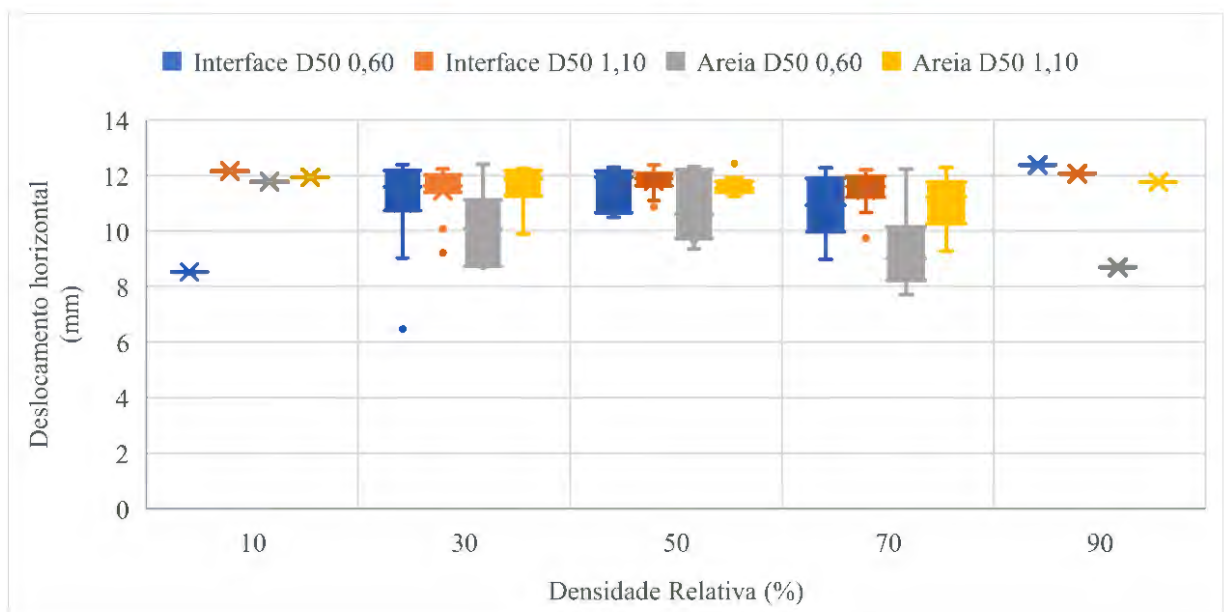
Por fim, a partir das curvas de tensão x deslocamento foram obtidos os valores da tensão cisalhante máxima, denominada de pico, e da menor tensão cisalhante no pós-pico, bem como seus respectivos coeficientes de atrito. Essas foram as variáveis consideradas como resposta para as análises estatísticas planejadas no programa da pesquisa, que serão discutidas nos itens subsequentes.

Figura 56 - Posição das tensões cisalhantes de pico



Fonte: O autor.

Figura 57 - Posições das tensões cisalhantes pós-pico



Fonte: O autor.

4.1.2 Fatorial cruzado

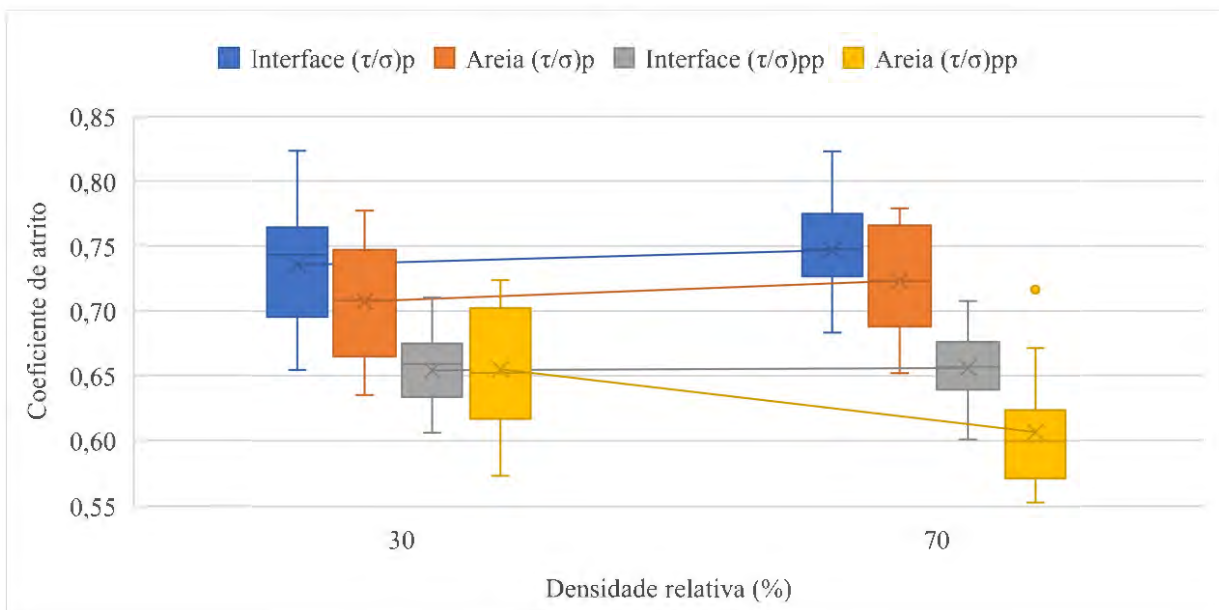
4.1.2.1 Coeficiente de atrito

A primeira etapa do planejamento dos ensaios de cisalhamento direto foi a execução de um modelo fatorial cruzado, tanto em interface quanto para areias puras, para as tensões cisalhantes de pico e pós-pico. Optou-se por representar essas respostas através do coeficiente de atrito, de forma a melhor visualizar a influência da tensão normal sobre o comportamento da

resistência ao cisalhamento. Os resultados utilizados nesta etapa estão contidos no Apêndice 2, contudo, foram utilizados apenas os 48 ensaios de interface e os 24 em areia correspondentes aos fatores controláveis e níveis reais indicados na Tabela 13 do item 3.2.

A análise se iniciou com a avaliação do efeito da densidade relativa, apresentada na Figura 58. Primeiramente, nota-se o comportamento da resistência ao cisalhamento com o aumento da densidade relativa, que cresce para as situações de pico de interface e areia, praticamente se estabiliza no caso de pós-pico da interface e decresce para o pós-pico de areia. O comportamento esperado, conforme Uesugi e Kishida (1986b), era o de crescimento da tensão cisalhante com o aumento da densidade relativa para o caso de pico e não influência no pós-pico. Portanto, pode-se afirmar que houve concordância parcial neste caso devido ao gráfico de pós-pico em areia, que apesar de apresentar um comportamento decrescente, possui um *outlier* acima do limite superior, que indica a possibilidade de valores maiores para a média. Na comparação entre os ensaios de interface e areia para as tensões de pico e pós-pico é obtido um coeficiente de atrito superior para o caso da interface, com exceção dos ensaios na condição de pós-pico com densidade relativa de 30%, nos quais as médias são praticamente as mesmas. Por fim, com relação a dispersão, exibe-se uma semelhança em todos os casos, com exceção dos ensaios de pós-pico em areia, para densidade relativa de 70%, no qual há a presença de um *outlier*, indicando a possibilidade de maior dispersão dos resultados, conforme visto no gráfico da densidade relativa de 30%.

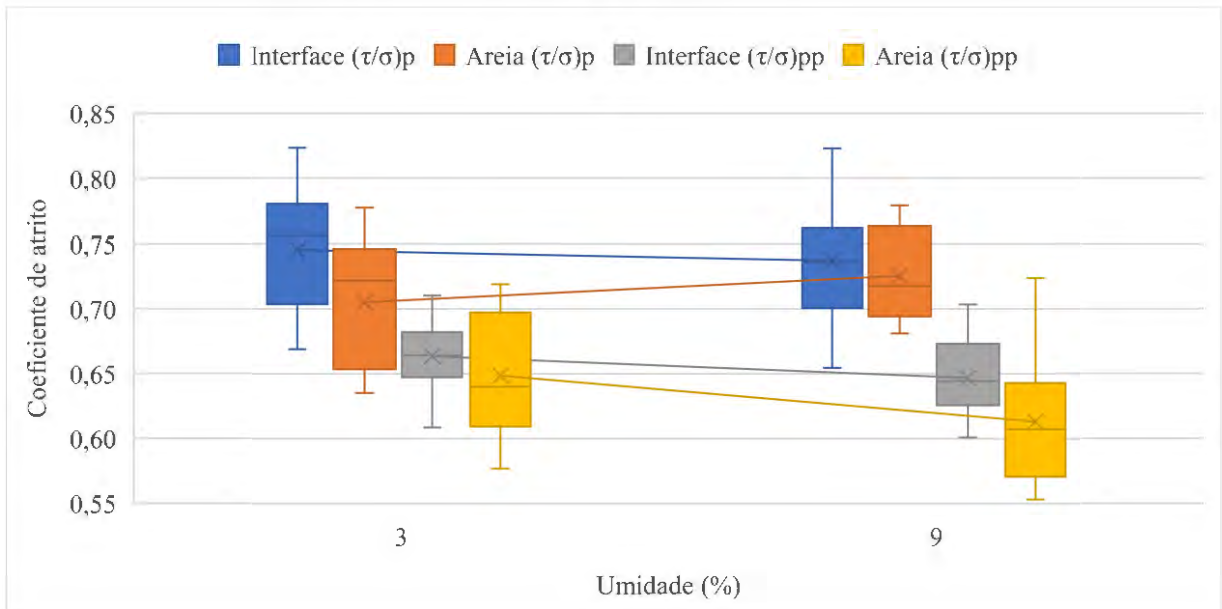
Figura 58 - Influência da densidade relativa no coeficiente de atrito



Fonte: O autor.

O fator seguinte a ser analisado é a umidade, cujo gráfico *boxplot* é apresentado na Figura 59. O comportamento geral do coeficiente de atrito é a sua diminuição com o acréscimo da umidade, que é o esperado conforme Tiwari e Al-Adhath (2014), estando presente na maioria dos casos, com exceção dos ensaios de areia para obtenção da tensão de pico. Devido à essa situação, cabe uma avaliação estatística mais robusta para definir com maior exatidão o comportamento encontrado. Com relação à comparação entre os ensaios de pico e pós-pico de interface e areia, foi obtido um comportamento semelhante ao caso da densidade relativa, com maiores valores de média incumbidos às análises de interface. Essa semelhança também é vista na dispersão dos resultados, que apresentam intervalos de tamanho próximo.

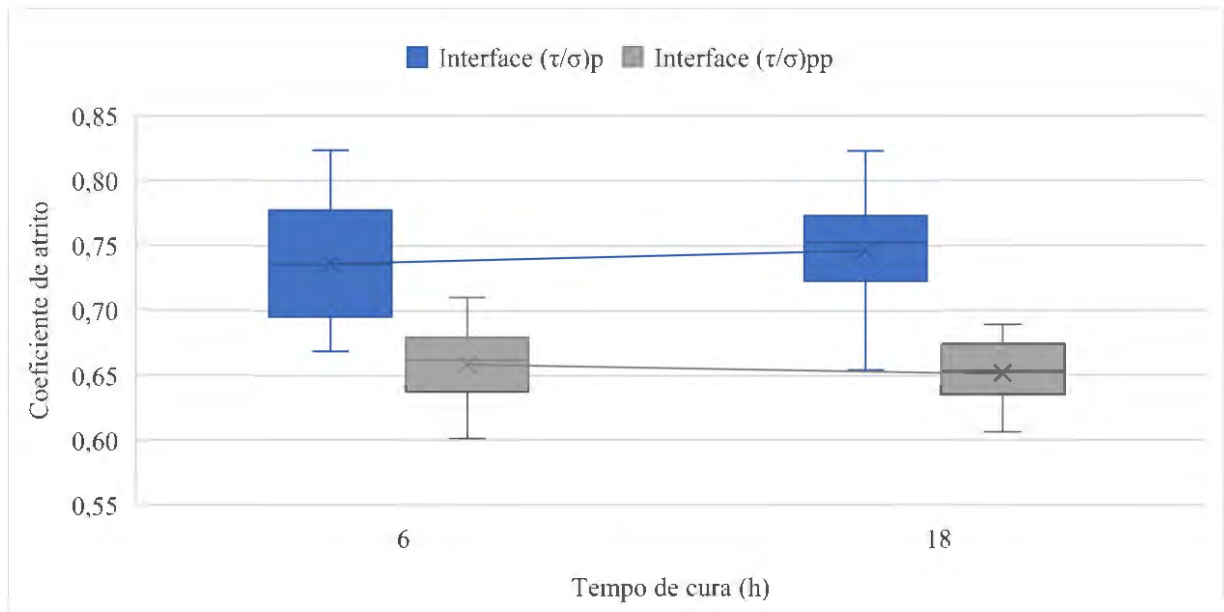
Figura 59 - Influência da umidade no coeficiente de atrito



Fonte: O autor.

A terceira análise foi referente ao tempo de cura do concreto, conforme demonstrado na Figura 60. Nessa análise apenas estão presentes os resultados dos ensaios de interface, que apresentam comportamentos diferentes para o caso de pico e de pós-pico. Percebe-se um coeficiente de atrito de pico levemente maior com o aumento do tempo de cura, enquanto que para o de pós-pico ocorre um valor menor. Vale ressaltar, contudo, a pequena diferença numérica entre as médias de cada tempo de cura, sendo as retas quase horizontais. Com relação à dispersão dos resultados é visto que os ensaios de pós-pico apresentam menor faixa de variação que os de pico.

Figura 60 - Influência do tempo de cura no coeficiente de atrito

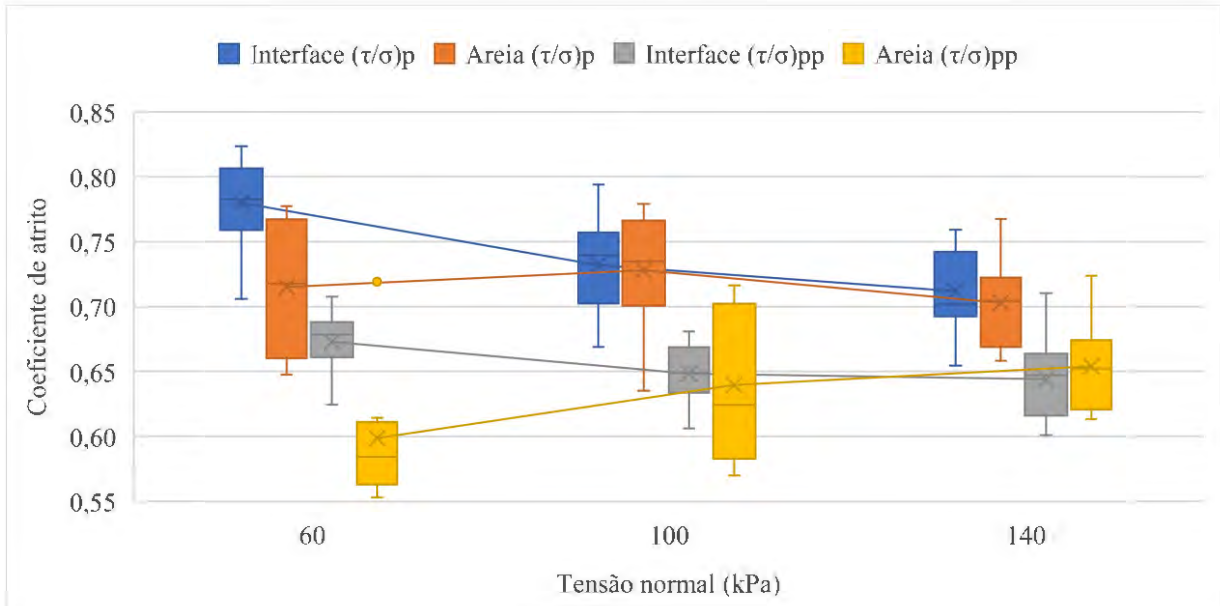


Fonte: O autor.

Uma das análises mais relevantes foi a do fator tensão normal, apresentada na Figura 61. Diferente das outras variáveis, a tensão foi estudada em 3 níveis reais, o que permitiu compreender melhor o comportamento da resistência ao cisalhamento. Primeiramente, nota-se que o comportamento do coeficiente de atrito foi decrescente para os ensaios de interface e crescente para os de areia com o aumento da tensão normal. Essa variação foi coerente com o observado na análise geral dos resultados do ensaio (item 4.1.1), na qual a curva correspondente à tensão de 60 kPa se localizava superior às outras no gráfico coeficiente de atrito x deslocamento horizontal. Com base nessas informações, será considerado um aspecto de adesão na definição dos parâmetros de resistência da interface nos itens subsequentes. Apenas com base no comportamento se pode concluir que essa parcela não é necessária nos ensaios em areia, pois como a menor tensão normal inferior atingiu coeficientes de atrito inferiores o intercepto no gráfico seria negativo, indicando que a melhor definição é uma reta passando pela origem, ou seja, com apenas a parcela de atrito. Vale ressaltar que para as curvas de interface a magnitude da variação da resposta de pós-pico causada pela tensão normal é cerca da metade da apresentada para o caso de pico, dessa forma, é necessária uma avaliação com base no valor do intercepto para sua utilização. Na comparação entre os ensaios de interface e areia para as tensões de pico e pós-pico é obtida, de forma geral, um coeficiente de atrito superior para o caso da interface, todavia, a diferença entre as médias vai diminuindo com o aumento da tensão normal. Por fim, com relação à dispersão, percebe-se uma maior precisão para os ensaios de

interface em relação aos de areia, que ainda exibem um *outlier* para o caso dos ensaios de pós-pico em areia para a tensão normal de 60 kPa.

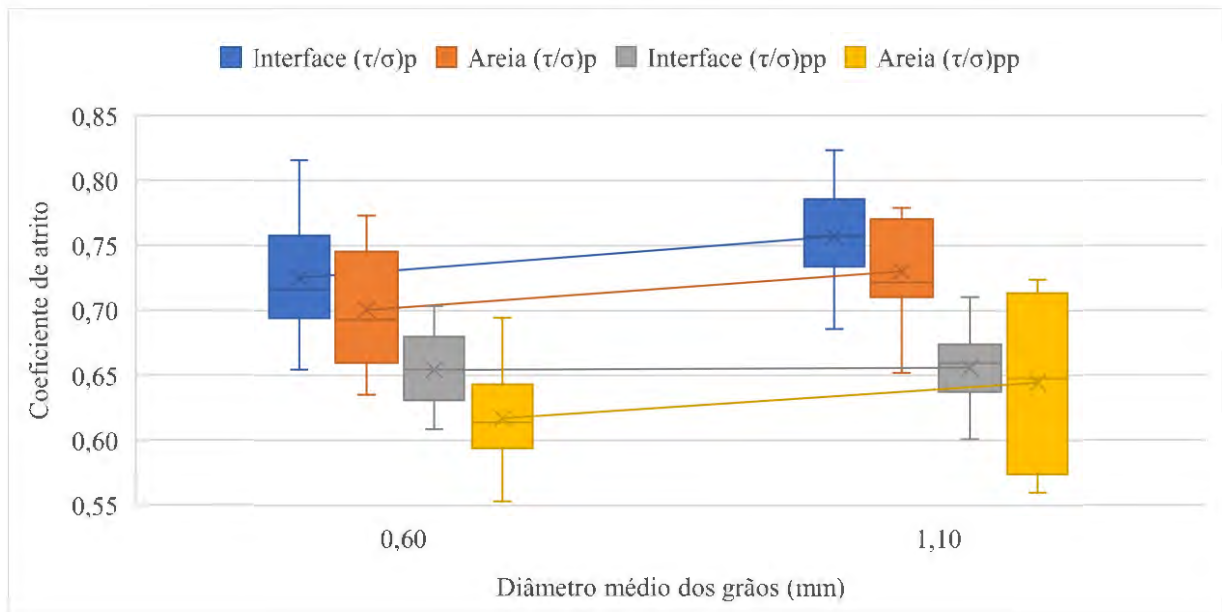
Figura 61 - Influência da tensão normal no coeficiente de atrito



Fonte: O autor.

O último fator a ser analisado nesta primeira etapa experimental foi o diâmetro médio dos grãos, cujo gráfico *boxplot* é apresentado na Figura 62. O comportamento geral do coeficiente de atrito é o seu crescimento com o aumento do tamanho dos grãos. Nota-se, entretanto, que para a tensão cisalhante de pós-pico da interface esse fator praticamente não tem influência, com uma reta quase horizontal. Nos estudos de Uesugi e Kishida (1986a; 1986b), para interfaces entre areia e aço, o comportamento definido foi de redução do coeficiente de atrito com o aumento do tamanho dos grãos, oposto ao observado. Todavia, como o presente estudo é realizado em concreto curado sobre tensão se presume que o aumento de resistência seja originário da rugosidade impressa na superfície do concreto durante a cura, ou seja, quanto maior o tamanho do grão, maior a rugosidade, gerando uma resistência superior. Com relação à magnitude da variação da resposta, percebe-se a mesma influência na tensão cisalhante de pico, seja em interface ou areia. Essa semelhança, contudo, não é observada nos ensaios de pós-pico, cuja causa pode estar relacionada à dispersão dos ensaios em areia desta resposta, que exibe o maior intervalo neste gráfico.

Figura 62 - Influência do diâmetro médio dos grãos no coeficiente de atrito

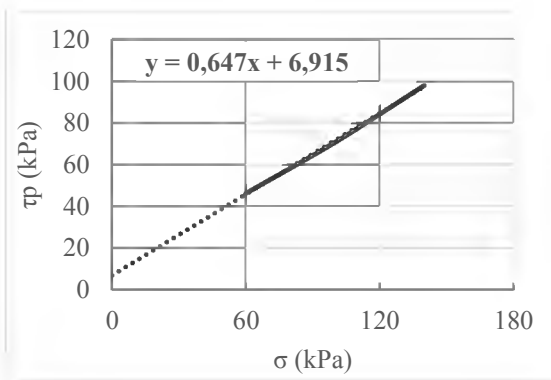


Fonte: O autor.

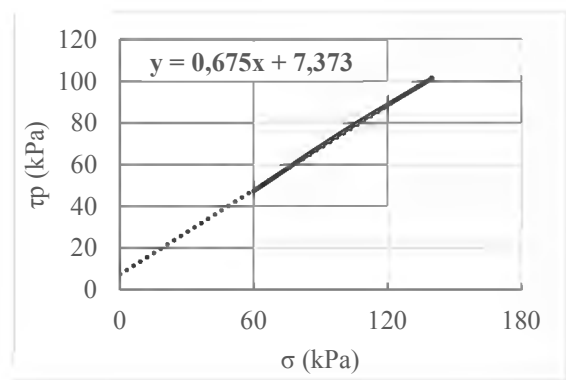
4.1.2.2 Parâmetros de resistência ao cisalhamento

O modelo fatorial cruzado também possuía como objetivo a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento da interface e da areia, levando em consideração os fatores controláveis densidade relativa, umidade, tempo de cura e diâmetro médio dos grãos. Para a obtenção dos parâmetros se utilizou a envoltória de Mohr-Coulomb, através da regressão linear dos resultados de tensão cisalhante dos ensaios para os níveis de tensão normal de 60, 100 e 140 kPa. Os componentes da envoltória no caso da interface são a aderência (c_a) e o ângulo de atrito na interface (δ), enquanto que para o solo natural são o intercepto coesivo (c) e o ângulo de atrito (ϕ). Contudo, conforme visto no item 4.1.2, o intercepto coesivo não é utilizado nos ensaios em areia, pois resultaria em um valor negativo, e é necessária uma avaliação dos valores para os casos de interface. Para determinação dos parâmetros de resistência na interface foram selecionados os valores médios de tensão cisalhante para as duas areias e realizadas regressões lineares sobre eles.

Na Figura 63 está apresentada a envoltória média de pico para a areia média (D50 0,60 mm), enquanto que na Figura 64 a da areia grossa (D50 1,10 mm). A partir da regressão linear foram obtidos para as amostras os valores de adesão de 6,92 e 7,37 kPa, respectivamente. Devido ao elevado valor das médias e para melhor entendimento dos efeitos das variáveis, optou-se por considerar o valor de adesão para ambas as amostras.

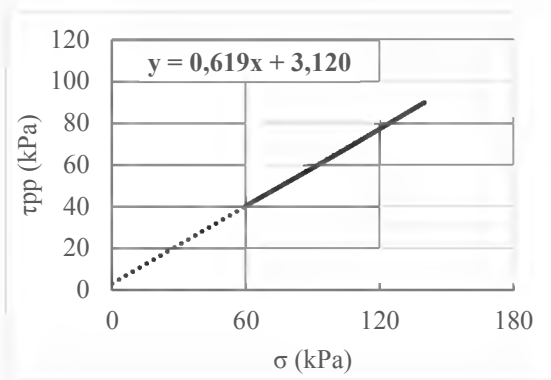
Figura 63 - Envoltória D50 0,60 mm: τ_p interface

Fonte: O autor.

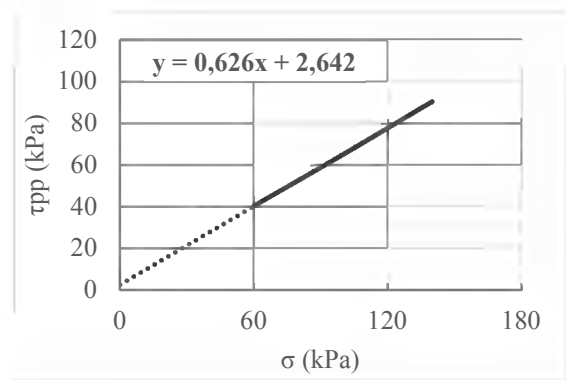
Figura 64 - Envoltória D50 1,10 mm: τ_p interface

Fonte: O autor.

A mesma análise foi feita para a envoltória média dos ensaios de interface no pós-pico para as areias com D50 0,60 mm (Figura 65) e D50 1,10 mm (Figura 66). Nesse caso os valores de adesão obtidos foram de 3,12 e 2,64 kPa, respectivamente. Para a situação de pós-pico, todavia, não há sentido físico na existência de uma parcela de adesão, pois após a máxima tensão de pico se presume que já foram rompidas quaisquer ligações iniciais entre a areia e o concreto. Portanto, o valor encontrado foi desconsiderado, com a reta da regressão linear tendo sua passagem forçada pela origem, como também imposto aos ensaios em areia pura.

Figura 65 - Envoltória D50 0,60 mm: τ_{pp} interface

Fonte: O autor.

Figura 66 - Envoltória D50 1,10 mm: τ_{pp} interface

Fonte: O autor.

A partir dessas considerações, foram então calculados os valores de adesão (c_a), ângulo de atrito da interface (δ), ângulo de atrito do solo (φ) e a razão entre os ângulos da interface e do solo (δ/φ) para as situações de pico, indicada pelo índice p , e de pós-pico, com subscrito pp , descritos na Tabela 18.

Com o intuito de melhor visualização da Tabela 18, foi elaborado o gráfico *boxplot* da variação dos ângulos de atrito para as duas amostras de areia, apresentado na Figura 67. Primeiramente, nota-se um comportamento análogo ao da Figura 62, pois se tratam dos mesmos resultados, apenas mais agrupados em virtude da regressão linear aplicada. É observado,

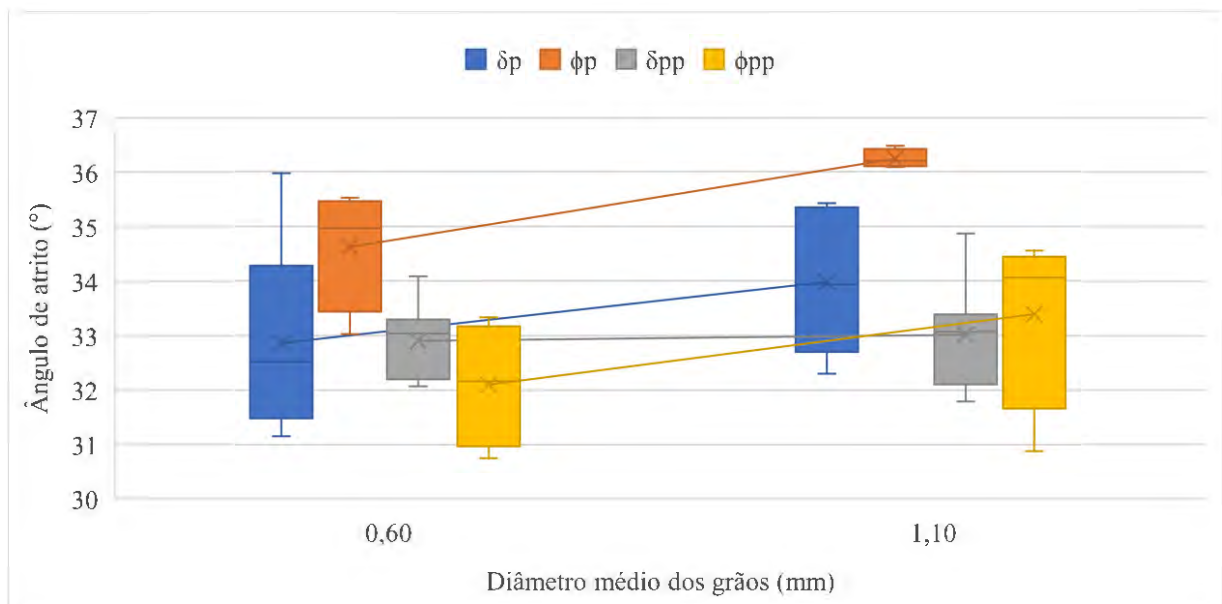
contudo, que para os ensaios de pico os valores da interface foram inferiores aos da areia. Isso ocorre devido à parcela da adesão não estar sendo demonstrada neste gráfico. Outras diferenças notadas são com relação a menor dispersão de alguns dos resultados, provavelmente em razão da condensação de 3 tensões cisalhantes em apenas um valor de ângulo de atrito.

Tabela 18 - Fatorial cruzado: Parâmetros de resistência ao cisalhamento

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	cap (kPa)	δp	ϕp	$(\delta/\phi)p$	δpp	ϕpp	$(\delta/\phi)pp$
0,60	30	3	6	7,78	31,44	33,03	0,95	33,33	32,69	1,02
0,60	30	9	6	8,64	32,31	35,52	0,91	32,16	33,33	0,96
0,60	70	3	6	6,95	32,73	34,69	0,94	33,02	31,64	1,04
0,60	70	9	6	12,68	31,16	35,25	0,88	32,31	30,75	1,05
0,60	30	3	18	6,27	32,92	33,03	1,00	33,18	32,69	1,02
0,60	30	9	18	5,66	31,64	35,52	0,89	32,07	33,33	0,96
0,60	70	3	18	5,41	34,73	34,69	1,00	34,08	31,64	1,08
0,60	70	9	18	1,95	35,97	35,25	1,02	33,06	30,75	1,08
1,10	30	3	6	7,25	35,42	36,23	0,98	34,87	34,55	1,01
1,10	30	9	6	8,50	32,58	36,47	0,89	33,06	34,12	0,97
1,10	70	3	6	9,56	32,30	36,08	0,90	33,48	34,01	0,98
1,10	70	9	6	6,48	33,06	36,16	0,91	31,85	30,88	1,03
1,10	30	3	18	6,02	35,24	36,23	0,97	33,11	34,55	0,96
1,10	30	9	18	8,07	33,54	36,47	0,92	31,79	34,12	0,93
1,10	70	3	18	7,04	34,34	36,08	0,95	32,88	34,01	0,97
1,10	70	9	18	6,04	35,38	36,16	0,98	33,08	30,88	1,07

Fonte: O autor.

Figura 67 - Influência do diâmetro médio dos grãos nos ângulos de atrito



Fonte: O autor.

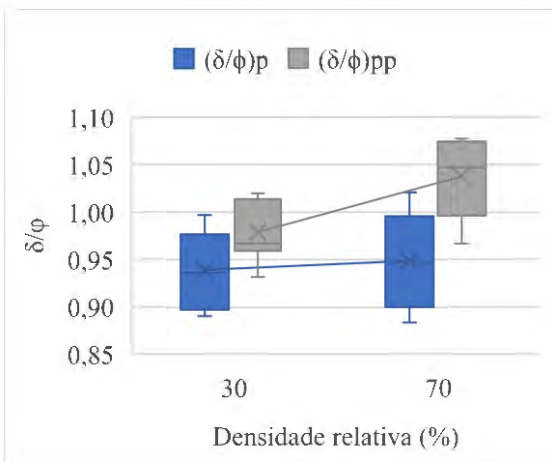
Os valores médios aproximados de adesão da interface no pico (cap), ângulo de atrito da interface no pico (δ_p), ângulo de atrito da interface no pós-pico (δ_{pp}), ângulo de atrito da areia no pico (ϕ_p) e ângulo de atrito da areia no pós-pico (ϕ_{pp}) foram, respectivamente, de 6,9 kPa, 32,9°, 32,9°, 34,6° e 32,1° para a areia média (D50 0,60 mm) e de 7,4 kPa, 34,0°, 33,0°, 36,2° e 33,4° para a areia grossa (D50 1,10 mm). Ainda, foram calculadas as razões entre os ângulos de atrito da interface e da areia, cuja média da areia com D50 0,60 mm foi de 0,95 para o caso de pico e 1,03 para o de pós-pico, próximos aos de 0,94 e 0,99, respectivamente, para a areia com D50 1,10 mm.

Foram também avaliados os efeitos de cada variável sobre as denominadas razões entre ângulos de atrito, uma combinação dos ensaios de interface com os de areia, e nos valores de adesão para a resistência de pico dos ensaios em interface. Gráficos *boxplot* foram apresentados para cada variável: densidade relativa (Figura 68 e Figura 69), umidade (Figura 70 e Figura 71), tempo de cura (Figura 72 e Figura 73) e diâmetro médio dos grãos (Figura 74 e Figura 75).

Da análise dos gráficos de razão entre ângulos de atrito se percebe, de forma geral, que os resultados de pós-pico são superiores aos de pico, fruto da não consideração da adesão. Com relação ao comportamento da resposta em função do crescimento das variáveis, esse é diferente entre os resultados de pico e de pós-pico para cada fator, com uma curva sofrendo maior alteração enquanto a outra se mantinha praticamente constante. Os resultados de pico foram mais influenciados pela umidade (Figura 70), com comportamento decrescente, e pelo tempo de cura (Figura 72), com comportamento crescente, enquanto que nos casos de pós-pico o destaque coube a densidade relativa (Figura 68), também crescente, e ao diâmetro médio dos grãos (Figura 74), de influência decrescente. Por fim, com relação à dispersão não se notam diferenças relevantes entre os fatores.

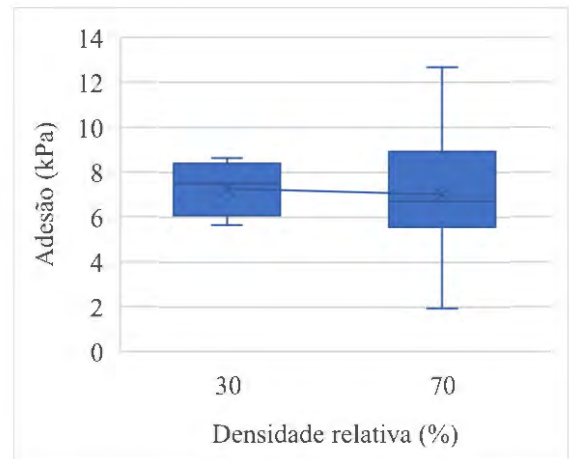
Com relação aos gráficos de adesão, evidencia-se, de forma geral, a pequena influência das variáveis no valor médio, exceto para o caso do tempo de cura. Na Figura 73 se nota uma diminuição da adesão com o tempo de cura, comportamento oposto ao visto na Figura 72, indicando que a influência dessa variável na magnitude da tensão cisalhante é inferior ao demonstrado apenas pela razão entre ângulos de atrito de pico.

Figura 68 - Influência da (DR) na (δ/ϕ)



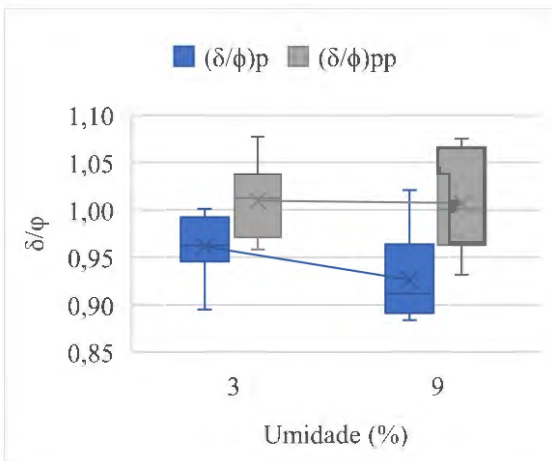
Fonte: O autor.

Figura 69 - Influência da (DR) na adesão



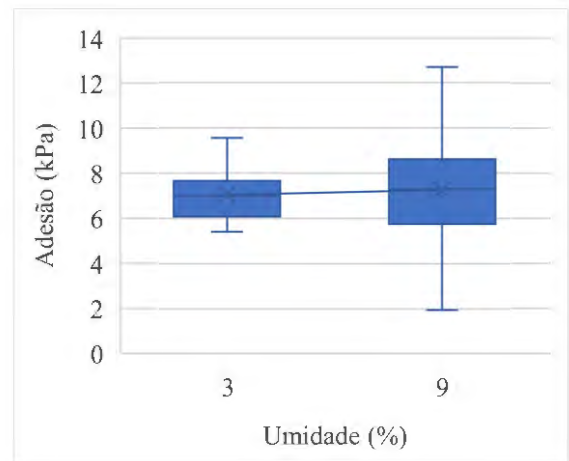
Fonte: O autor.

Figura 70 - Influência da (w) na (δ/ϕ)



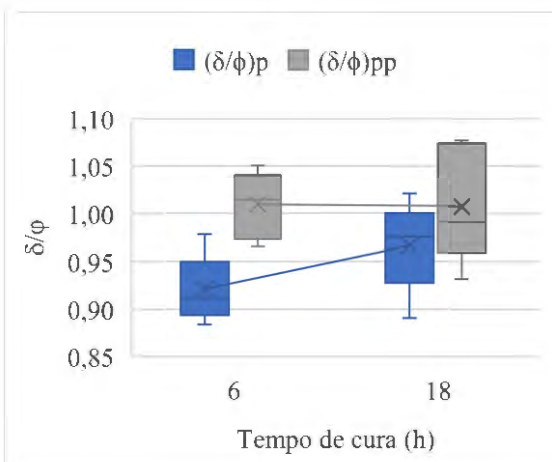
Fonte: O autor.

Figura 71 - Influência da (w) na adesão



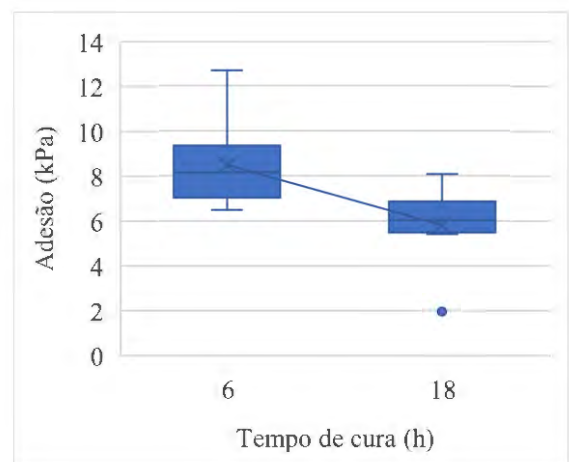
Fonte: O autor.

Figura 72 - Influência do (t) na (δ/ϕ)

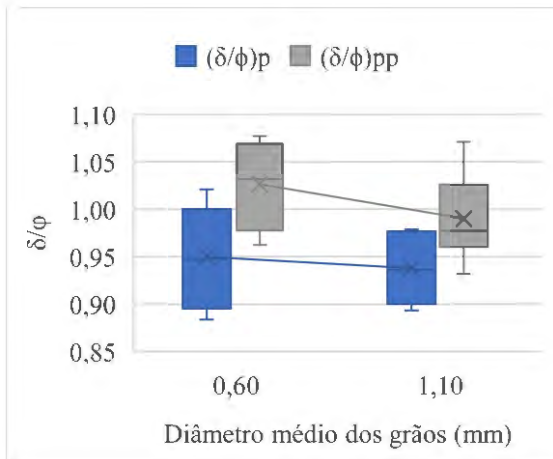


Fonte: O autor.

Figura 73 - Influência do (t) na adesão

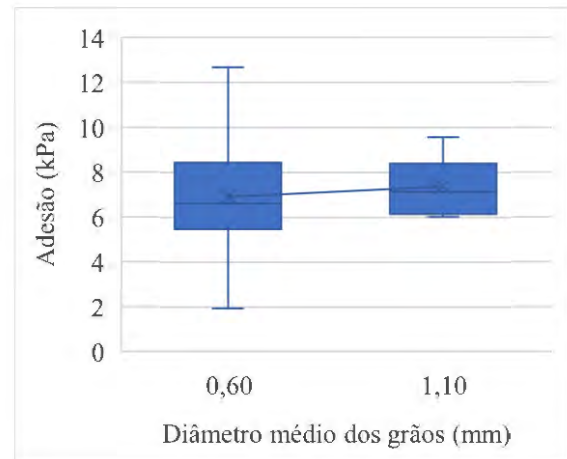


Fonte: O autor.

Figura 74 - Influência do (D50) na (δ/ϕ) 

Fonte: O autor.

Figura 75 - Influência do (D50) na adesão



Fonte: O autor.

4.1.3 Metodologia de Superfície de Resposta

4.1.3.1 Modelos para tensão cisalhante

A segunda etapa do planejamento dos ensaios de cisalhamento direto foi a execução da metodologia de superfície de resposta (RSM) para cada amostra de areia e tipo de ensaio (interface e areia pura). As respostas analisadas foram as tensões cisalhantes de pico e pós-pico, pois apresentaram como resultado modelos mais significativos. Os fatores controláveis, suas respectivas unidades e os níveis reais dos ensaios foram indicados na Tabela 14 do item 3.2, enquanto que os resultados utilizados nessa etapa estão descritos no Apêndice 2. Vale ressaltar que devido ao formato da própria metodologia não foram utilizados os ensaios com tensão normal de 100 kPa para as densidades relativas de 30% e 70%. Dessa forma, cada superfície de resposta para os ensaios de interface foi composta por 30 ensaios, enquanto que os modelos de areia necessitaram de apenas 20.

O primeiro modelo matemático obtido através da análise de regressão em um *software* estatístico foi para a tensão cisalhante de pico dos ensaios de interface para a areia média (D50 0,60 mm). Como a quantidade e disposição dos ensaios permite um maior detalhamento da região de estudo, o modelo utilizado foi de segunda ordem, sendo apresentado na Equação 25. O valor de R^2 obtido através da regressão foi de 0,9894.

$$\begin{aligned}
 T_p = & 17,8661 - 0,1669 \cdot DR - 1,1575 \cdot w - 0,9218 \cdot t + 0,5995 \cdot S \\
 & + 0,0064 \cdot DR \cdot w + 0,0087 \cdot DR \cdot t + 0,0010 \cdot DR \cdot S \\
 & - 0,0436 \cdot w \cdot t - 0,0006 \cdot w \cdot S + 0,0040 \cdot t \cdot S \\
 & + 0,0004 \cdot DR^2 + 0,1277 \cdot w^2 + 0,0153 \cdot t^2 - 0,0003 \cdot S^2
 \end{aligned} \tag{25}$$

Para verificar a adequação do modelo foi realizada a análise de variância (ANOVA), que identifica se os valores da variável de resposta medidos nos diversos níveis diferem entre si, apresentada na Tabela 19. Primeiramente, nota-se que o modelo foi significativo, resultado da influência dos fatores densidade relativa (A) e tensão normal (D). Nota-se ainda que o parâmetro correspondente à umidade ao quadrado (B^2), apesar de não satisfazer o critério do intervalo de confiança de 95%, possui um valor-p entre 0,05 e 0,10, o que indica algum efeito sobre a resposta. Pode-se perceber também que a falta de ajuste do modelo não foi significativa quando comparada ao erro puro, indicando que há 60,40% de chance de que um valor F calculado de 0,87 ocorra devido a perturbações no ensaio e não ao erro puro.

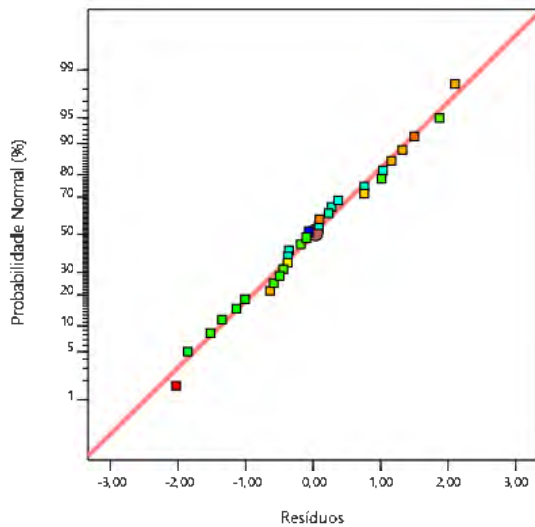
Tabela 19 - ANOVA D50 0,60 mm: τ_p interface

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	Valor-p	Significância
Modelo	15702,20	14	1121,59	100,19	< 0,0001	significativo
A-DR	120,63	1	120,63	10,78	0,0050	significativo
B-w	2,42	1	2,42	0,22	0,6485	
C-t	0,35	1	0,35	0,03	0,8628	
D-S	15470,61	1	15470,61	1381,92	< 0,0001	significativo
AB	2,35	1	2,35	0,21	0,6536	
AC	17,54	1	17,54	1,57	0,2298	
AD	10,05	1	10,05	0,90	0,3584	
BC	9,86	1	9,86	0,88	0,3628	
BD	0,10	1	0,10	0,01	0,9272	
CD	14,74	1	14,74	1,32	0,2692	
A ²	0,60	1	0,60	0,05	0,8205	
B ²	36,23	1	36,23	3,24	0,0922	
C ²	8,33	1	8,33	0,74	0,4020	
D ²	5,98	1	5,98	0,53	0,4760	
Erro	167,93	15	11,20			
Falta de ajuste	106,60	10	10,66	0,87	0,6040	não significativo
Erro puro	61,33	5	12,27			
Total	15870,13	29				

Fonte: O autor.

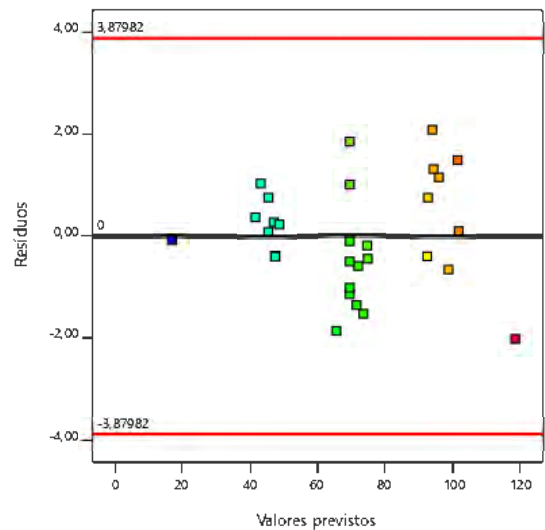
Ainda, foram analisados os resíduos com o objetivo de validar as suposições da análise de variância, através da confirmação da distribuição normal dos resíduos e na sua aleatoriedade em função dos valores previstos. Os gráficos obtidos foram os da probabilidade normal dos resíduos (Figura 76) e da relação entre os resíduos e os valores de resposta previstos pelo modelo (Figura 77). A partir destes se nota uma quase perfeita distribuição normal e nenhuma relação óbvia entre os resíduos e os valores previstos, satisfazendo os requisitos da ANOVA.

Figura 76 - Probabilidade Normal Resíduos
D50 0,60 mm: τ_p interface



Fonte: O autor.

Figura 77 - Previsão x Resíduos D50 0,60 mm:
 τ_p interface



Fonte: O autor.

O segundo modelo também foi elaborado para a areia média (D50 0,60 mm), entretanto para a tensão cisalhante de pós-pico dos ensaios de interface. A Equação 26 descreve o modelo encontrado, com valor de R^2 de 0,9914. A partir dele foi elaborada a análise ANOVA, detalhada na Tabela 20.

$$\begin{aligned}
 T_{pp} = & 11,4513 - 0,2849 \cdot DR + 0,0910 \cdot w - 0,5631 \cdot t + 0,6288 \cdot S \\
 & + 0,0084 \cdot DR \cdot w + 0,0056 \cdot DR \cdot t + 0,0009 \cdot DR \cdot S \\
 & - 0,0275 \cdot w \cdot t - 0,0137 \cdot w \cdot S + 0,0023 \cdot t \cdot S \\
 & + 0,0012 \cdot DR^2 + 0,065 \cdot w^2 + 0,0088 \cdot t^2 - 0,00005 \cdot S^2
 \end{aligned} \quad (26)$$

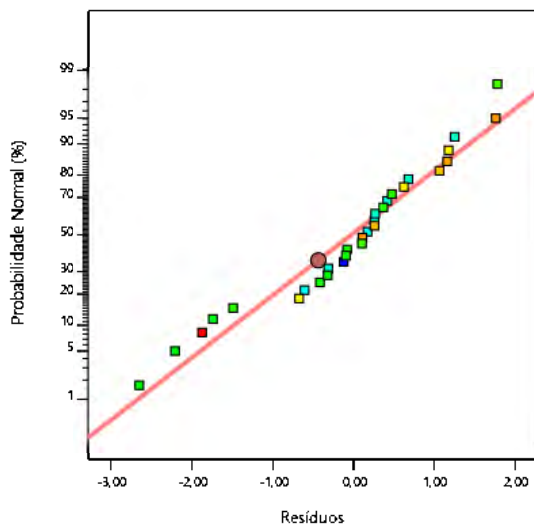
Através da ANOVA foi confirmada a significância do modelo, bem como da variável tensão normal (D) e da interação entre a umidade e a tensão normal (BD). Além disso, a própria variável umidade (B) possui um efeito intermediário sobre a resposta, com um valor-p de 0,0544. Destaca-se, ainda, que a falta de ajuste do modelo não foi significativa, com uma chance de 50,57% do valor F calculado de ocorrer devido às perturbações no ensaio e não ao erro puro.

Na sequência foi realizada a análise de resíduos, cujo gráfico de distribuição normal é apresentado na Figura 78, enquanto a relação entre os resíduos e os valores previstos na Figura 79. Nestes gráficos se notam resíduos mais afastados de zero, todavia, a tendência geral ainda ocorre em torno da reta da Figura 78 e não há nenhum padrão na Figura 79, indicando o cumprimento das condições da ANOVA.

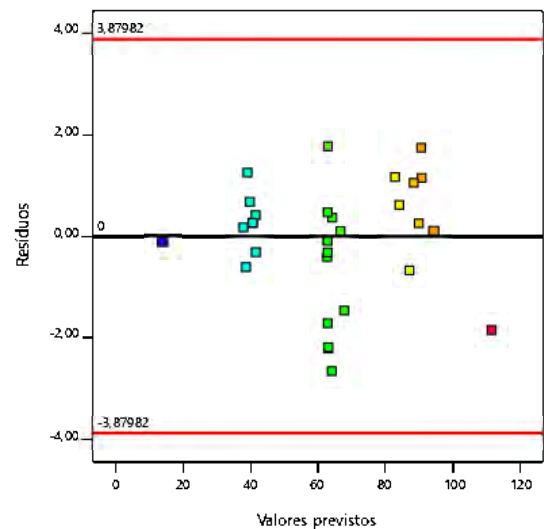
Tabela 20 - ANOVA D50 0,60 mm: tpp interface

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	Valor-p	Significância
Modelo	14410,91	14	1029,35	123,28	< 0,0001	significativo
A-DR	19,10	1	19,10	2,29	0,1512	
B-w	36,36	1	36,36	4,35	0,0544	
C-t	0,04	1	0,04	0,00	0,9483	
D-S	14267,60	1	14267,60	1708,82	< 0,0001	significativo
AB	4,07	1	4,07	0,49	0,4958	
AC	7,11	1	7,11	0,85	0,3707	
AD	7,96	1	7,96	0,95	0,3442	
BC	3,93	1	3,93	0,47	0,5034	
BD	43,19	1	43,19	5,17	0,0381	significativo
CD	5,00	1	5,00	0,60	0,4509	
A ²	6,77	1	6,77	0,81	0,3820	
B ²	9,34	1	9,34	1,12	0,3070	
C ²	2,75	1	2,75	0,33	0,5747	
D ²	0,15	1	0,15	0,02	0,8966	
Erro	125,24	15	8,35			
Falta de ajuste	85,12	10	8,51	1,06	0,5057	não significativo
Erro puro	40,12	5	8,02			
Total	14536,16	29				

Fonte: O autor.

Figura 78 - Probabilidade Normal Resíduos
D50 0,60 mm: tpp interface

Fonte: O autor.

Figura 79 - Previsão x Resíduos D50 0,60 mm:
tpp interface

Fonte: O autor.

Dando continuidade aos ensaios de interface, foi desenvolvido o modelo de segunda ordem referente à tensão cisalhante de pico da areia grossa (D50 1,10 mm), descrito na Equação 27, cujo R^2 foi de 0,9897.

$$\begin{aligned} T_p = & 24,7935 - 0,2451 \cdot DR - 4,5409 \cdot w - 0,7060 \cdot t + 0,7274 \cdot S \\ & + 0,0202 \cdot DR \cdot w + 0,0084 \cdot DR \cdot t - 0,0003 \cdot DR \cdot S \\ & + 0,0683 \cdot w \cdot t - 0,0029 \cdot w \cdot S + 0,0027 \cdot t \cdot S \\ & + 0,0009 \cdot DR^2 + 0,2318 \cdot w^2 - 0,0067 \cdot t^2 - 0,0003 \cdot S^2 \end{aligned} \quad (27)$$

Para verificação da equação foi realizada a ANOVA (Tabela 21), que identificou o modelo como significativo, devido à influência dos fatores tensão normal (D) e umidade ao quadrado (B^2). Ainda, o tempo de cura (C) apresentou o valor-p intermediário de 0,0678. Nesse caso, contudo, percebe-se que a falta de ajuste do modelo foi significativa, com uma chance de apenas 2,18% disto ocorrer devido às perturbações. A explicação desse valor está relacionada à maior homogeneidade das repetições utilizadas na determinação do erro puro, fazendo com que para o mesmo erro total a parcela da falta de ajuste ficasse maior.

Tabela 21 - ANOVA D50 1,10 mm: τ_p interface

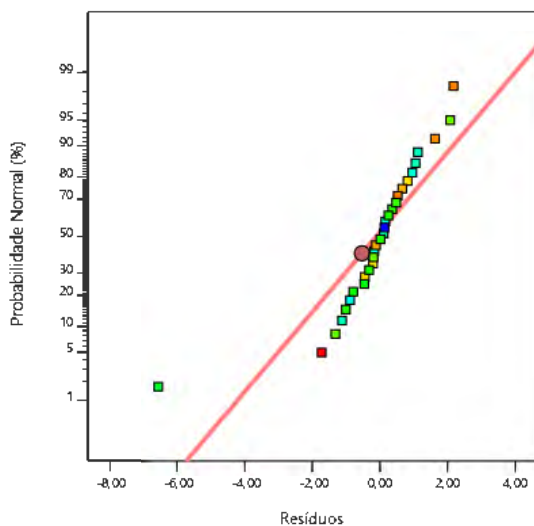
Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	Valor-p	Significância
Modelo	17132,48	14	1223,75	103,35	< 0,0001	significativo
A-DR	11,98	1	11,98	1,01	0,3305	
B-w	10,60	1	10,60	0,89	0,3592	
C-t	45,89	1	45,89	3,88	0,0678	
D-S	16845,72	1	16845,72	1422,71	< 0,0001	significativo
AB	23,54	1	23,54	1,99	0,1790	
AC	16,16	1	16,16	1,36	0,2609	
AD	0,73	1	0,73	0,06	0,8067	
BC	24,16	1	24,16	2,04	0,1737	
BD	1,96	1	1,96	0,17	0,6899	
CD	6,66	1	6,66	0,56	0,4648	
A ²	3,20	1	3,20	0,27	0,6108	
B ²	119,34	1	119,34	10,08	0,0063	significativo
C ²	1,59	1	1,59	0,13	0,7188	
D ²	7,74	1	7,74	0,65	0,4315	
Erro	177,61	15	11,84			
Falta de ajuste	165,85	10	16,58	7,05	0,0218	significativo
Erro puro	11,76	5	2,35			
Total	17310,08	29				

Fonte: O autor.

Ainda, para satisfazer os requisitos da ANOVA foram elaborados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos (Figura 80) e da relação entre os resíduos e os valores previstos (Figura 81). A partir dessa análise se nota um *outlier*, que tende a modificar a reta da distribuição normal, além de possuir resíduos superiores ao limite do teste *RStudent*. Foi verificado que ensaio em questão se trata do DR 10% - w 6% - t 12h - S 100 kPa, ou seja, um dos ensaios “estrela”, cuja função é definir a curvatura da resposta dentro dos níveis do fatorial 2k. Ao se verificar o resultado do ensaio, nota-se que ele apresentava a menor tensão de pico, em virtude da baixíssima densidade relativa inicial, todavia como a curva do ensaio e o comportamento dos deslocamentos foram coerentes com a literatura e seus pares, a análise foi mantida. Ressalva-se que esse ponto está fora do intervalo de confiança (DR 30 a 70%) utilizado para previsão de pontos através dos modelos obtidos.

Figura 80 - Probabilidade Normal Resíduos

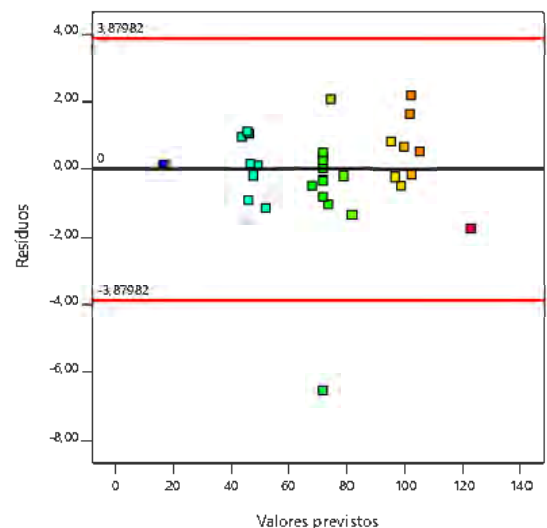
D50 1,10 mm: τ_p interface



Fonte: O autor.

Figura 81 - Previsão x Resíduos D50 1,10 mm:

τ_p interface



Fonte: O autor.

O último modelo para os ensaios de interface foi para a tensão cisalhante de pós-pico da areia grossa (D50 1,10 mm), cujo resultado é dado pelo Equação 28. O valor de R^2 encontrado foi de 0,9922. Para sua conferência foi realizada a análise ANOVA, detalhada na Tabela 22.

$$\begin{aligned}
 T_{pp} = & -1,0829 + 0,0054 \cdot DR + 0,0879 \cdot w - 0,3561 \cdot t + 0,8003 \cdot S \\
 & + 0,0070 \cdot DR \cdot w + 0,0069 \cdot DR \cdot t - 0,0012 \cdot DR \cdot S \\
 & - 0,0430 \cdot w \cdot t - 0,0107 \cdot w \cdot S + 0,0006 \cdot t \cdot S \\
 & - 0,0001 \cdot DR^2 - 0,0224 \cdot w^2 - 0,0165 \cdot t^2 - 0,0003 \cdot S^2
 \end{aligned} \tag{28}$$

Tabela 22 - ANOVA D50 1,10 mm: tpp interface

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	Valor-p	Significância
Modelo	14631,05	14	1045,08	136,61	< 0,0001	significativo
A-DR	0,31	1	0,31	0,04	0,8426	
B-w	31,77	1	31,77	4,15	0,0596	
C-t	7,41	1	7,41	0,97	0,3406	
D-S	14510,90	1	14510,90	1896,82	< 0,0001	significativo
AB	2,82	1	2,82	0,37	0,5525	
AC	10,89	1	10,89	1,42	0,2513	
AD	14,27	1	14,27	1,86	0,1922	
BC	9,58	1	9,58	1,25	0,2808	
BD	26,31	1	26,31	3,44	0,0835	
CD	0,32	1	0,32	0,04	0,8410	
A ²	0,02	1	0,02	0,00	0,9635	
B ²	1,11	1	1,11	0,15	0,7080	
C ²	9,72	1	9,72	1,27	0,2773	
D ²	8,47	1	8,47	1,11	0,3093	
Erro	114,75	15	7,65			
Falta de ajuste	89,78	10	8,98	1,80	0,2686	não significativo
Erro puro	24,97	5	4,99			
Total	14745,81	29				

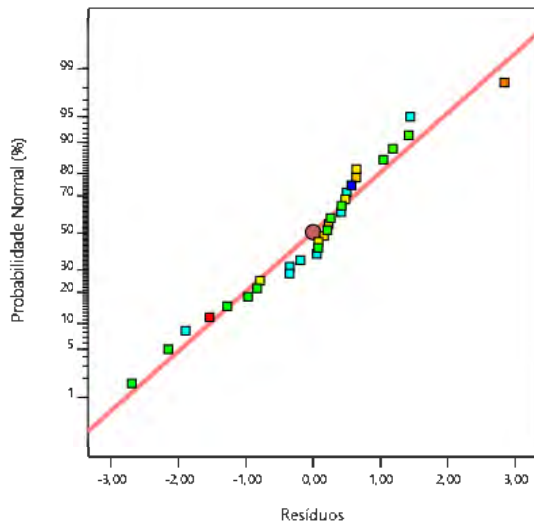
Fonte: O autor.

Por meio da ANOVA se identificou o modelo como significativo, contando apenas com a influência tensão normal (D) e, de forma intermediária, da umidade (B) e da interação entre a umidade e a tensão normal (BD). Ainda, foi encontrada que a falta de ajuste do modelo não foi significativa, com 26,86% de chance de ocorrência devidos às perturbações do ensaio. Na confirmação da ANOVA, através da análise de resíduos, se notam valores mais afastados do zero, todavia, mantendo a tendência em torno da reta que representa a distribuição normal na Figura 82 e sem ocorrência de nenhum padrão na Figura 83.

Através da Metodologia de Superfície de Resposta também foram elaborados modelos de segunda ordem para as tensões cisalhantes de pico e pós-pico para os ensaios em areia. Dessa forma, na sequência é descrita na Equação 29 a tensão cisalhante de pico para a areia média (D50 0,60 mm), cujo valor de R² obtido foi de 0,9854.

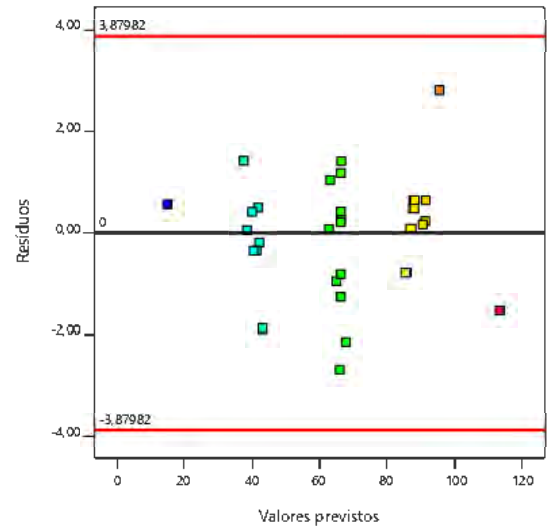
$$\begin{aligned}
 T_p = & -20,4544 + 0,2334 \cdot DR + 2,7066 \cdot w + 0,8519 \cdot S \\
 & - 0,0093 \cdot DR \cdot w - 0,0021 \cdot DR \cdot S + 0,0048 \cdot w \cdot S \\
 & + 0,0014 \cdot DR^2 - 0,1806 \cdot w^2 - 0,0006 \cdot S^2
 \end{aligned} \quad (29)$$

Figura 82 - Probabilidade Normal Resíduos
D50 1,10 mm: τ pp interface



Fonte: O autor.

Figura 83 - Previsão x Resíduos D50 1,10 mm:
 τ pp interface



Fonte: O autor.

Na Tabela 23 está apresentada a ANOVA para a tensão de-pico da RSM em areia para a areia média (D50 0,60 mm). Primeiramente, nota-se que o modelo foi significativo, resultado da influência apenas do fator tensão normal (C). Percebe-se ainda que os parâmetros correspondentes a densidade relativa (A) e a umidade ao quadrado (B^2) possuem um valor-p entre 0,05 e 0,10, o que indica algum efeito sobre a resposta. Pode-se visualizar também que a falta de ajuste do modelo foi significativa quando comparada ao erro puro, indicando que há 3,74% de chance de que um valor F calculado de 5,86 ocorra devido a perturbações no ensaio e não ao erro puro. A explicação desse valor também está relacionada à maior homogeneidade das repetições para determinação do erro, juntamente com a menor quantidade de ensaios utilizada na determinação da falta de ajuste.

Ainda, foram analisados os resíduos para validar as suposições da análise de variância, na qual os gráficos obtidos para probabilidade normal dos resíduos (Figura 84) e da relação entre os resíduos e os valores de resposta previstos pelo modelo (Figura 85) não indicaram nenhum problema com os resultados.

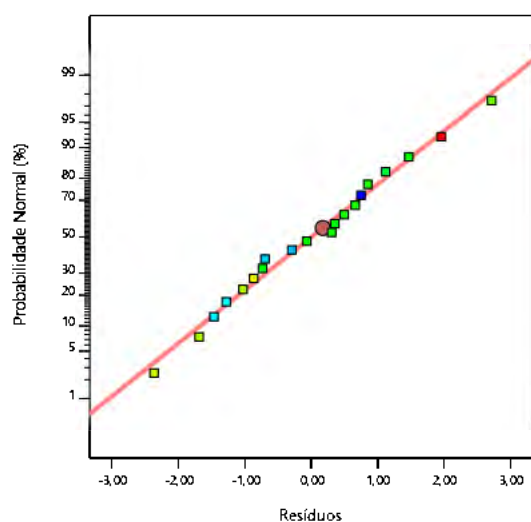
O modelo seguinte também foi elaborado para a areia média (D50 0,60 mm), contudo, nesse caso para a tensão cisalhante de pós-pico dos ensaios de interface. A Equação 30 descreve o modelo encontrado, com valor de R^2 de 0,9811. A partir dela foi elaborada a análise ANOVA, detalhada na Tabela 24.

$$T_{pp} = -8,4049 - 0,1365 \cdot DR + 2,0218 \cdot w + 0,7549 \cdot S \\ - 0,0046 \cdot DR \cdot w - 0,0008 \cdot DR \cdot S + 0,0006 \cdot w \cdot S \\ + 0,0019 \cdot DR^2 - 0,1201 \cdot w^2 - 0,0002 \cdot S^2 \quad (30)$$

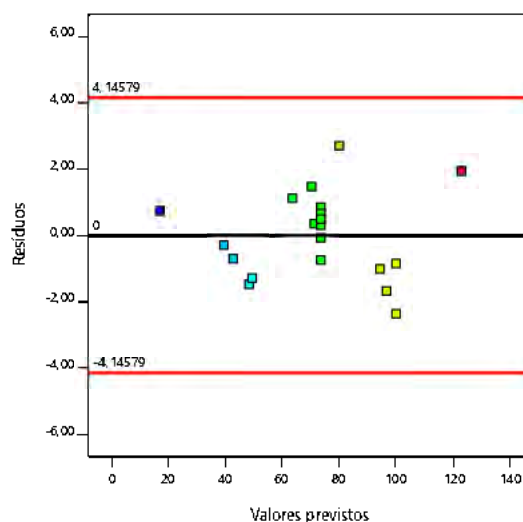
Tabela 23 - ANOVA D50 0,60 mm: τ_p areia

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	Valor-p	Significância
Modelo	11469,83	9	1274,43	74,78	< 0,0001	significativo
A-DR	78,86	1	78,86	4,63	0,0570	
B-w	43,89	1	43,89	2,58	0,1396	
C-S	11217,55	1	11217,55	658,25	< 0,0001	significativo
AB	2,47	1	2,47	0,14	0,7116	
AC	21,77	1	21,77	1,28	0,2848	
BC	2,60	1	2,60	0,15	0,7040	
A ²	7,81	1	7,81	0,46	0,5139	
B ²	66,43	1	66,43	3,90	0,0766	
C ²	21,40	1	21,40	1,26	0,2886	
Erro	170,41	10	17,04			
Falta de ajuste	145,56	5	29,11	5,86	0,0374	significativo
Erro puro	24,85	5	4,97			
Total	11640,24	19				

Fonte: O autor.

Figura 84 - Probabilidade Normal Resíduos
D50 0,60 mm: τ_p areia

Fonte: O autor.

Figura 85 - Previsão x Resíduos D50 0,60 mm:
 τ_p areia

Fonte: O autor.

Tabela 24 - ANOVA D50 0,60 mm: τ_{pp} areia

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	Valor-p	Significância
Modelo	11591,81	9	1287,98	57,54	< 0,0001	significativo
A-DR	18,59	1	18,59	0,83	0,3835	
B-w	23,87	1	23,87	1,07	0,3261	
C-S	11487,18	1	11487,18	513,18	< 0,0001	significativo
AB	0,61	1	0,61	0,03	0,8720	
AC	3,25	1	3,25	0,15	0,7113	
BC	0,04	1	0,04	0,00	0,9682	
A ²	14,50	1	14,50	0,65	0,4396	
B ²	29,37	1	29,37	1,31	0,2787	
C ²	3,81	1	3,81	0,17	0,6885	
Erro	223,84	10	22,38			
Falta de ajuste	153,26	5	30,65	2,17	0,2074	não significativo
Erro puro	70,58	5	14,12			
Total	11815,66	19				

Fonte: O autor.

Através da ANOVA foi confirmada a significância do modelo, devido, exclusivamente ao papel da tensão normal (C). Destaca-se, ainda, que a falta de ajuste do modelo não foi significativa, com uma chance de 20,74% do valor F calculado de ocorrer devido às perturbações no ensaio e não ao erro puro.

Na sequência foi realizada a análise de resíduos, na qual se percebe o afastamento de um ponto do gráfico de distribuição normal (Figura 86), referente ao ensaio DR 50% - w12% - S 100 kPa. O valor da diferença, contudo, foi inferior ao tolerado na relação entre os resíduos e os valores previstos (Figura 87), portanto, manteve-se o resultado.

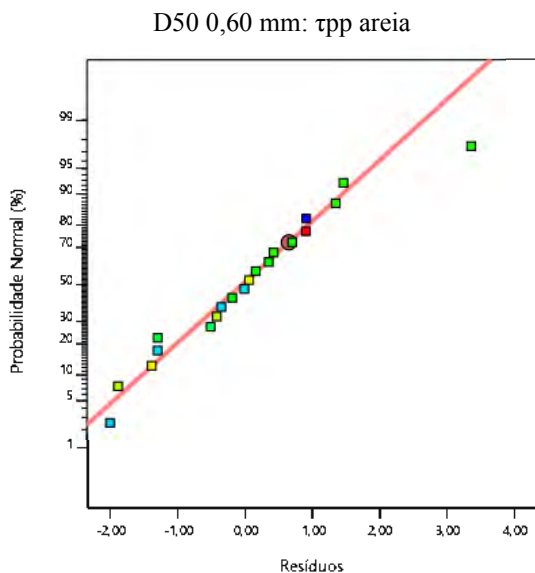
Dando continuidade aos ensaios em areia, foi desenvolvido o modelo de segunda ordem referente à tensão cisalhante de pico da areia grossa (D50 1,10 mm), descrito na Equação 31, cujo R² foi de 0,9764.

$$\begin{aligned}
 T_p = & 9,2474 - 0,4569 \cdot DR - 0,3374 \cdot w + 0,6684 \cdot S \\
 & - 0,0008 \cdot DR \cdot w - 0,0002 \cdot DR \cdot S + 0,0043 \cdot w \cdot S \\
 & + 0,0056 \cdot DR^2 + 0,0488 \cdot w^2 + 0,0002 \cdot S^2
 \end{aligned} \quad (31)$$

Para verificação do modelo foi realizada a ANOVA (Tabela 25), que identificou o modelo como significativo, devido à influência do fator tensão normal (C) e, de forma intermediária, da densidade relativa (A²). Nesse caso, entretanto, também se percebe que a falta

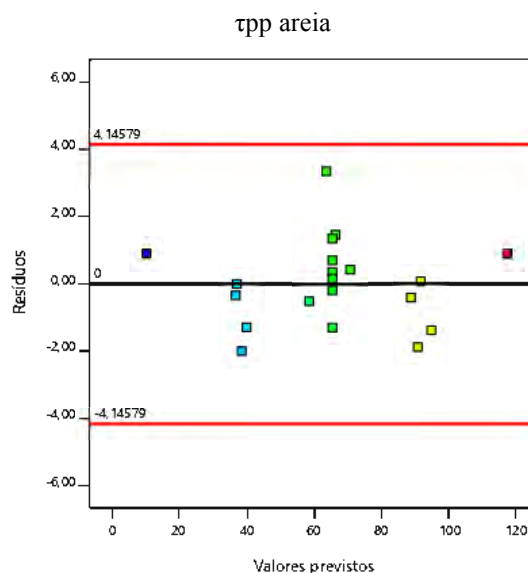
de ajuste do modelo foi significativa, com uma chance de apenas 4,61% disto ocorrer devido apenas às perturbações, cuja causa foi o maior erro total obtido.

Figura 86 - Probabilidade Normal Resíduos



Fonte: O autor.

Figura 87 - Previsão x Resíduos D50 0,60 mm:



Fonte: O autor.

Tabela 25 - ANOVA D50 1,10 mm: τ_{pp} areia

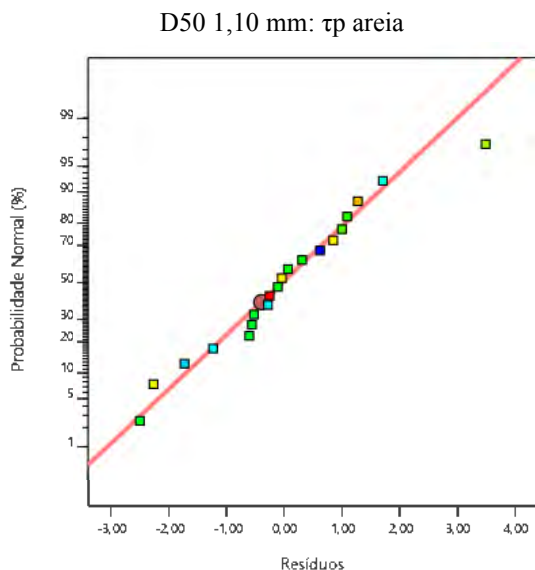
Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	Valor-p	Significância
Modelo	13562,92	9	1506,99	46,00	< 0,0001	significativo
A-DR	39,95	1	39,95	1,22	0,2954	
B-w	58,74	1	58,74	1,79	0,2102	
C-S	13335,34	1	13335,34	407,02	< 0,0001	significativo
AB	0,02	1	0,02	0,00	0,9820	
AC	0,17	1	0,17	0,01	0,9437	
BC	2,13	1	2,13	0,06	0,8041	
A ²	125,67	1	125,67	3,84	0,0786	
B ²	4,85	1	4,85	0,15	0,7085	
C ²	2,17	1	2,17	0,07	0,8022	
Erro	327,64	10	32,76			
Falta de ajuste	275,36	5	55,07	5,27	0,0461	significativo
Erro puro	52,28	5	10,46			
Total	13890,56	19				

Fonte: O autor.

Para satisfazer os requisitos da ANOVA foram elaborados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos (Figura 88) e da relação entre os resíduos e os valores previstos (Figura 89). A partir dessa análise se nota que o ensaio DR 90% - w 6% - S 100 kPa se afasta da reta

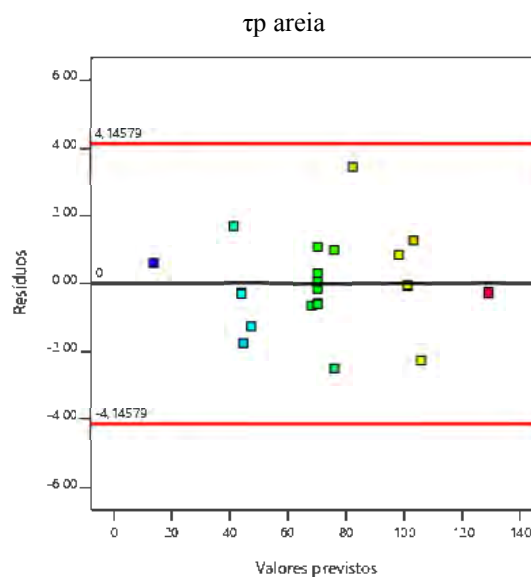
da distribuição normal, contudo o valor da diferença foi inferior ao limite do teste *RStudent*, validando a análise.

Figura 88 - Probabilidade Normal Resíduos



Fonte: O autor.

Figura 89 - Previsão x Resíduos D50 1,10 mm:



Fonte: O autor.

Finalizando os modelos, está o caso referente aos ensaios de areia para a tensão cisalhante de pós-pico da areia grossa (D50 1,10 mm), cujo resultado é dado pelo Equação 32. O valor de R^2 encontrado foi de 0,9798. Para sua conferência foi realizada a análise ANOVA, detalhada na Tabela 26.

$$\begin{aligned} T_{pp} = & 6,6400 - 0,3091 \cdot DR + 0,2742 \cdot w + 0,5629 \cdot S \\ & - 0,0132 \cdot DR \cdot w - 0,0009 \cdot DR \cdot S + 0,0098 \cdot w \cdot S \\ & + 0,0044 \cdot DR^2 - 0,0367 \cdot w^2 + 0,0007 \cdot S^2 \end{aligned} \quad (32)$$

Por meio da análise de variância se identificou o modelo como significativo, apenas devido à influência tensão normal (D). Ainda, foi encontrada que a falta de ajuste do modelo não foi significativa, com 14,14% de chance de ocorrência em virtude das perturbações do ensaio. Na confirmação da ANOVA, através da análise de resíduos, nota-se na Figura 90 a tendência dos pontos em torno da reta que representa a distribuição normal, sem a ocorrência de nenhum padrão na Figura 91.

Após a obtenção de modelos matemáticos que representam fenômenos físicos, é de suma importância a realização de ensaios de validação, cujo objetivo é avaliar se as funções que melhor descrevem o comportamento da amostra do estudo indicam de forma satisfatória os resultados para outros casos. Esses ensaios devem estar contidos dentro dos níveis reais de

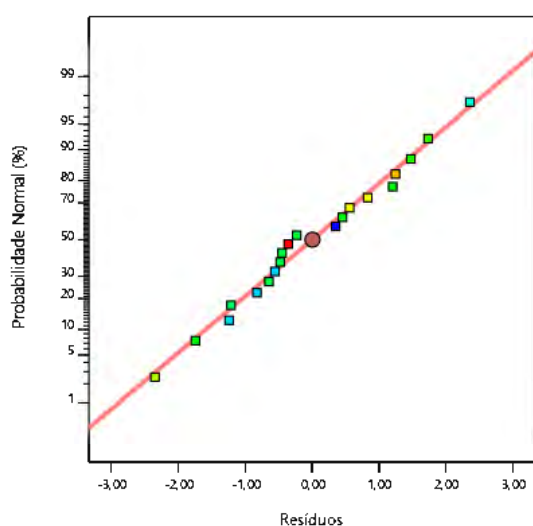
variação dos fatores controláveis, permitindo a comparação entre os resultados experimentais e os do modelo.

Tabela 26 - ANOVA D50 1,10 mm: τ_{pp} areia

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	Valor-p	Significância
Modelo	12969,40	9	1441,04	53,91	< 0,0001	significativo
A-DR	8,80	1	8,80	0,33	0,5787	
B-w	3,11	1	3,11	0,12	0,7400	
C-S	12828,13	1	12828,13	479,92	< 0,0001	significativo
AB	5,05	1	5,05	0,19	0,6730	
AC	4,18	1	4,18	0,16	0,7009	
BC	10,97	1	10,97	0,41	0,5362	
A ²	78,52	1	78,52	2,94	0,1173	
B ²	2,75	1	2,75	0,10	0,7551	
C ²	27,87	1	27,87	1,04	0,3313	
Erro	267,3	10	26,73			
Falta de ajuste	196,96	5	39,39	2,80	0,1414	não significativo
Erro puro	70,34	5	14,07			
Total	13236,7	19				

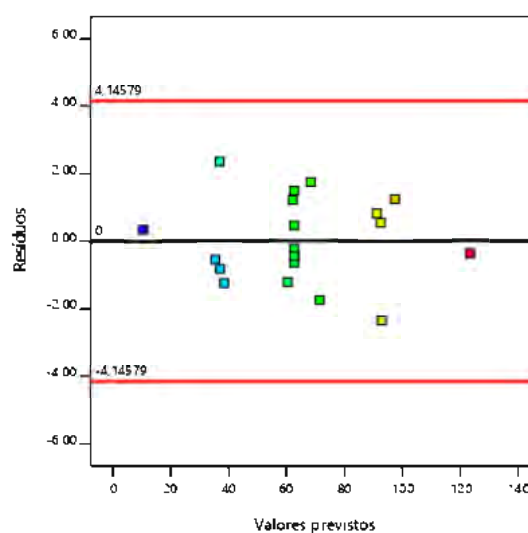
Fonte: O autor.

Figura 90 - Probabilidade Normal Resíduos
D50 1,10 mm: τ_{pp} areia



Fonte: O autor.

Figura 91 - Previsão x Resíduos D50 1,10 mm:
 τ_{pp} areia



Fonte: O autor.

Relembra-se que alguns resultados do método fatorial cruzado não foram utilizados na determinação do modelo do presente estudo. Desta forma, realizou-se a comparação dos resultados do modelo com experimentais através dos ensaios com tensão normal de 100 kPa, para as densidades relativas de 30% e 70%. Foram utilizados 16 ensaios de cisalhamento direto

em interface (Tabela 27) e 8 em areia (Tabela 28), que fornecem respostas de tensão cisalhante de pico e pós-pico, totalizando 48 valores. Cada grupo das tabelas corresponde a um modelo diferente que foi avaliado, tanto de tensão cisalhante no pico quanto no pós-pico, sendo eles de interface ou de areia pura, para ambas amostras de areia.

Tabela 27 - Comparação entre resultados experimentais e modelos de interface

N	DR (%)	w (%)	t (h)	σ (kPa)	D50 (mm)	τ_p interface (kPa)				τ_{pp} interface (kPa)			
						Ensaio	Modelo	Diferença		Ensaio	Modelo	Diferença	
1	30	3	6	100	0,60	66,90	69,46	2,55	3,8%	66,77	65,43	1,34	2,0%
2	30	9	6	100	0,60	70,12	70,89	0,78	1,1%	63,68	62,95	0,73	1,1%
3	70	3	6	100	0,60	68,32	71,08	2,76	4,0%	62,91	64,87	1,97	3,1%
4	70	9	6	100	0,60	73,16	74,05	0,90	1,2%	65,14	64,41	0,73	1,1%
5	30	3	18	100	0,60	70,62	69,17	1,45	2,1%	60,87	65,01	4,14	6,8%
6	30	9	18	100	0,60	67,86	67,47	0,39	0,6%	65,78	60,55	5,23	8,0%
7	70	3	18	100	0,60	75,72	74,98	0,74	1,0%	67,63	67,12	0,51	0,8%
8	70	9	18	100	0,60	72,63	74,82	2,19	3,0%	64,66	64,67	0,01	0,0%
9	30	3	6	100	1,10	79,40	76,10	3,29	4,1%	67,18	69,16	1,98	2,9%
10	30	9	6	100	1,10	74,57	69,89	4,68	6,3%	66,88	64,47	2,41	3,6%
11	70	3	6	100	1,10	73,91	73,08	0,83	1,1%	65,96	66,90	0,94	1,4%
12	70	9	6	100	1,10	74,83	71,72	3,12	4,2%	64,19	63,89	0,30	0,5%
13	30	3	18	100	1,10	76,49	74,40	2,09	2,7%	63,25	64,85	1,60	2,5%
14	30	9	18	100	1,10	74,02	73,10	0,92	1,2%	60,62	63,26	2,64	4,3%
15	70	3	18	100	1,10	77,02	75,40	1,62	2,1%	63,87	65,89	2,02	3,2%
16	70	9	18	100	1,10	75,59	78,95	3,36	4,5%	68,09	65,97	2,12	3,1%

Fonte: O autor.

Tabela 28 - Comparação entre resultados experimentais e modelos de areia

N	DR (%)	w (%)	σ (kPa)	D50 (mm)	τ_p areia (kPa)				τ_{pp} areia (kPa)			
					Ensaio	Modelo	Diferença		Ensaio	Modelo	Diferença	
1	30	3	100	0,60	63,51	68,12	4,60	7,2%	62,43	64,62	2,20	3,5%
2	30	9	100	0,60	75,06	72,54	2,52	3,4%	69,46	67,62	1,84	2,6%
3	70	3	100	0,60	72,56	73,67	1,11	1,5%	60,79	63,02	2,24	3,7%
4	70	9	100	0,60	73,30	75,87	2,57	3,5%	57,44	64,91	7,47	13,0%
5	30	3	100	1,10	73,64	69,35	4,29	5,8%	70,46	63,73	6,72	9,5%
6	30	9	100	1,10	69,22	73,27	4,05	5,9%	62,44	66,20	3,77	6,0%
7	70	3	100	1,10	77,15	72,60	4,55	5,9%	71,64	63,84	7,80	10,9%
8	70	9	100	1,10	77,91	76,34	1,57	2,0%	56,99	63,13	6,14	10,8%

Fonte: O autor.

Através dessa comparação foi possível observar a diferença entre os valores experimentais e os do modelo, que variaram de 0,01 a 7,80 kPa, o equivalente a 0,0 a 13,0%. Todavia, para avaliar a relevância desses valores em cada modelo se deve ter em consideração o intervalo de confiança (IC) de 95%, que fornece os limites de variação esperados, frutos do desvio-padrão e da distribuição *RStudent*, obtidos por meio da análise estatística. Na Tabela 29 estão apresentadas as magnitudes das variações esperadas, através do intervalo de confiança, para cada diâmetro médio dos grãos e uma tensão normal de 100 kPa.

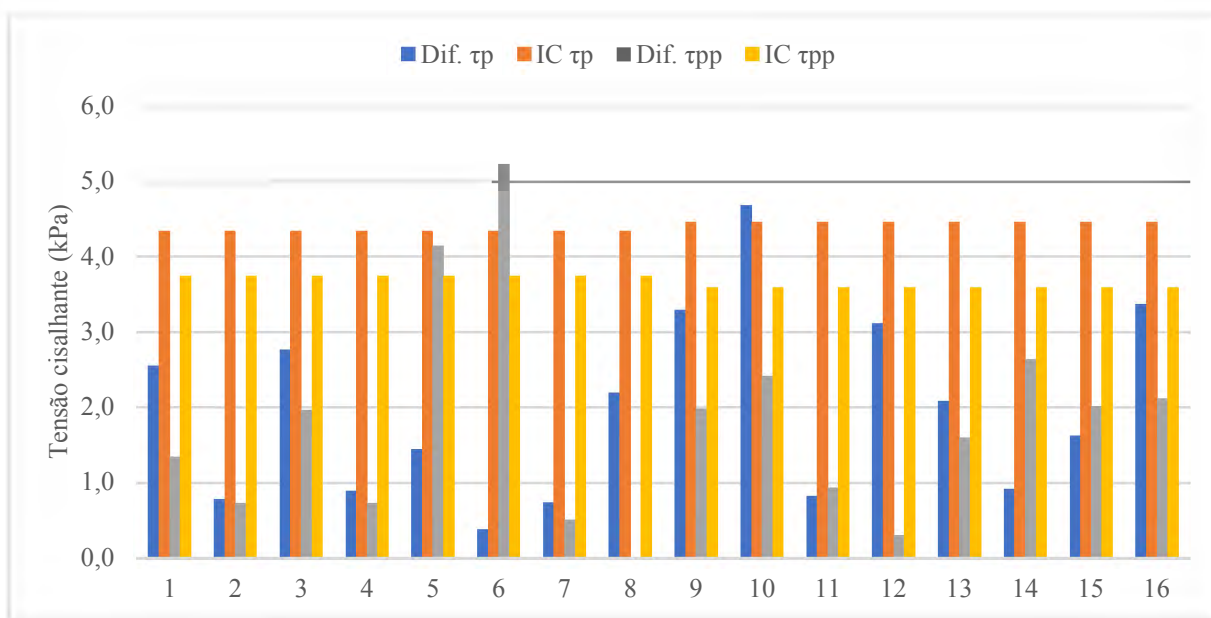
Tabela 29 - Intervalo de confiança dos modelos

Modelo	σ (kPa)	D50 (mm)	IC - 95% (kPa)
τ_p interface	100	0,60	4,34
		1,10	4,46
τ_{pp} interface	100	0,60	3,74
		1,10	3,59
τ_p areia	100	0,60	5,23
		1,10	7,26
τ_{pp} areia	100	0,60	6,00
		1,10	6,56

Fonte: O autor.

Portanto, realizou-se a comparação entre as diferenças encontradas e os valores do intervalo de confiança. Para os ensaios em interface (Figura 92) se identificou valores de tensão cisalhante de pós-pico superiores aos limites para os casos 5 e 6, correspondentes ao modelo de areia grossa. Nota-se, ainda, que para a conferência deste mesmo modelo são utilizados os ensaios 1 a 8, que possuem, de forma geral, uma das menores variações, o que pode indicar uma grande variabilidade dentre os próprios ensaios. Na Figura 92 também foi identificada uma diferença superior ao intervalo de confiança na tensão cisalhante de pico do ensaio 10, contudo, muito próxima ao limite, ultrapassando-o em apenas 0,22 kPa.

Figura 92 - Diferenças entre resultados experimentais e modelos em interface



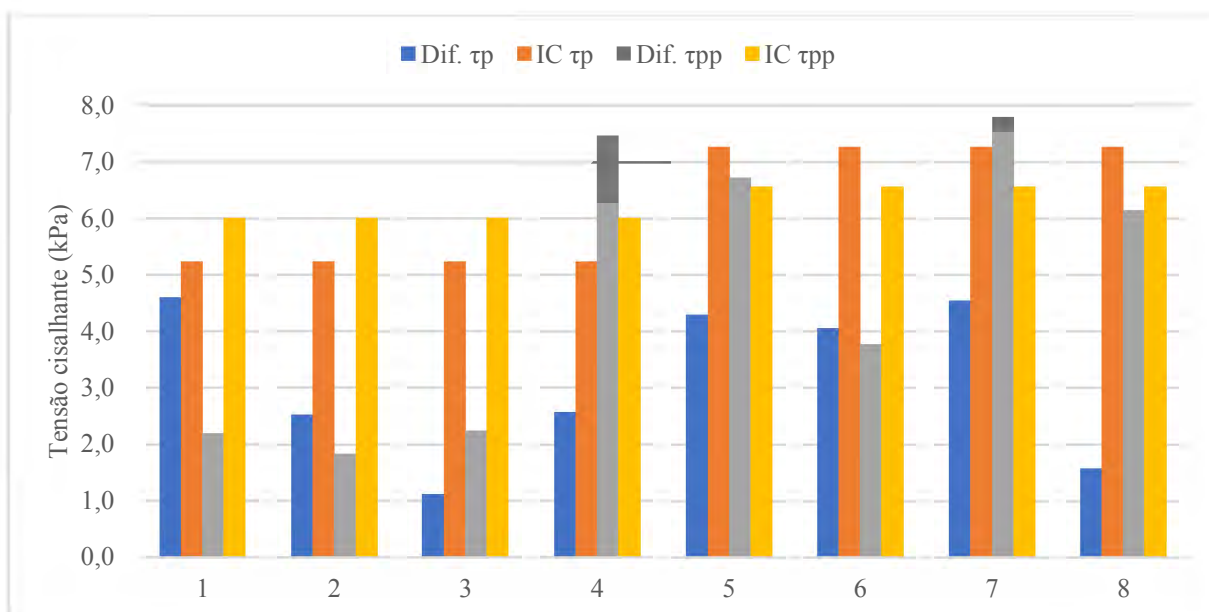
Fonte: O autor.

Por fim, foi feita a avaliação dos ensaios em areia, apresentada na Figura 93, que possuem maiores dispersões dos resultados, mas limites superiores do intervalo de confiança,

devido à menor quantidade de respostas utilizadas na confecção do modelo. O primeiro valor identificado foi referente à diferença da tensão de pós-pico do ensaio 4, que pode ser considerado um *outlier* ao ser comparado aos ensaios de 1 a 3, que fazem parte da avaliação do mesmo modelo e apresentaram diferenças menores e semelhantes entre si. Valores elevados também foram observados para a tensão de pós-pico dos ensaios 5 e 7, que retratam o modelo de tensão pós-pico para a areia grossa. Nota-se que todos os casos desse modelo (5 a 8) possuem valores maiores de diferença entre os resultados experimentais e estatísticos, indicando a necessidade da realização de mais ensaios em estudos futuros, para obtenção de um modelo mais ajustado às respostas para este caso específico.

Com base nestas análises, concluiu-se que os modelos fornecem, de forma geral, valores condizentes com os obtidos de forma experimental. Há apenas a ressalva com relação ao modelo de tensão pós-pico para a areia grossa, que apresentou as diferenças mais elevadas entre os ensaios e os valores calculados.

Figura 93 - Diferenças entre resultados experimentais e modelos em areia



Fonte: O autor.

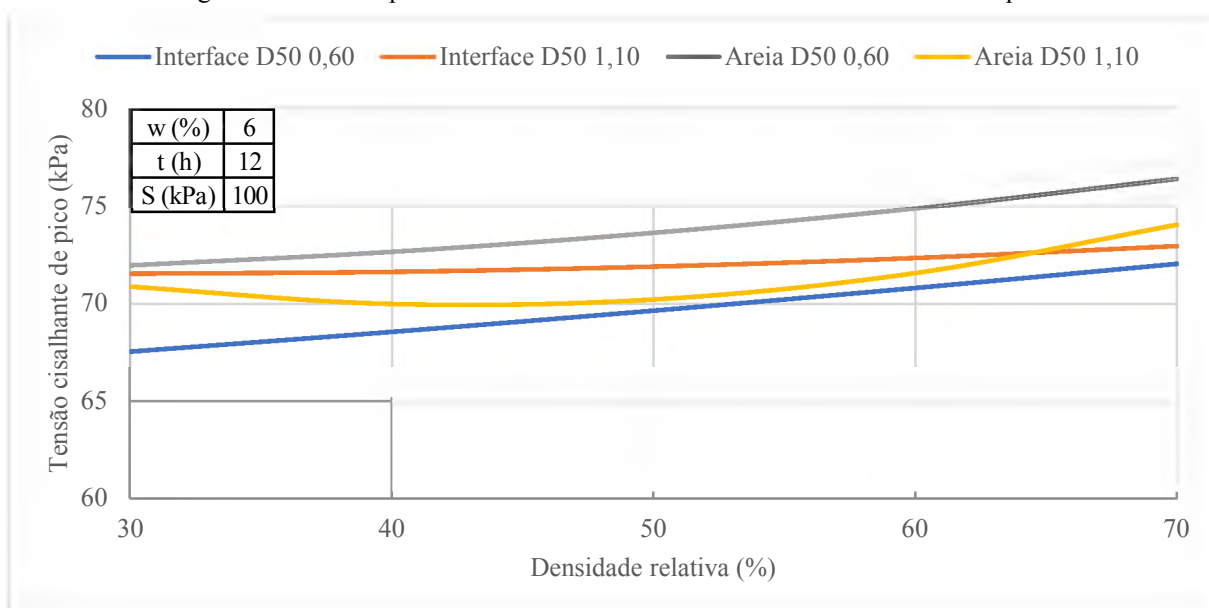
4.1.3.2 Análise paramétrica

Com a garantia de todos os modelos assegurados, buscou-se avaliar de que forma os fatores controláveis influenciam na resposta. Para visualizar esses efeitos foram realizadas análises paramétricas da tensão de cisalhante de pico e de pós-pico para cada fator: densidade relativa, umidade, tempo de cura e tensão normal. Estas análises demonstram como a resposta

varia em função do fator, enquanto as outras variáveis assumem seus valores médios, que estão apresentados em cada gráfico.

A primeira análise permitiu avaliar os efeitos da densidade relativa na tensão de pico (Figura 94) e de pós-pico (Figura 95). Com relação ao comportamento das curvas, percebe-se que ele é crescente para os quatro casos de pico, enquanto que nos resultados de tensão pós-pico os ensaios em areia possuem curvas decrescentes e os de interface levemente crescentes. O comportamento parabólico e a tendência decrescente, presentes nos ensaios de areia pura, foram considerados como uma interpretação errônea da variação experimental, devido à falta de sentido físico desse fenômeno. Ainda, na análise da magnitude dos valores, percebe-se uma inversão entre as amostras, com a areia D50 0,60 mm apresentando tensões superiores nos ensaios em areia enquanto a areia D50 1,10 mm nos ensaios de interface. Por fim, a taxa de variação dos parâmetros está totalmente relacionada aos valores-p da análise ANOVA, sendo superior para a tensão de pico da areia média, na qual foi um parâmetro significativo.

Figura 94 - Análise paramétrica da densidade relativa na tensão cisalhante de pico

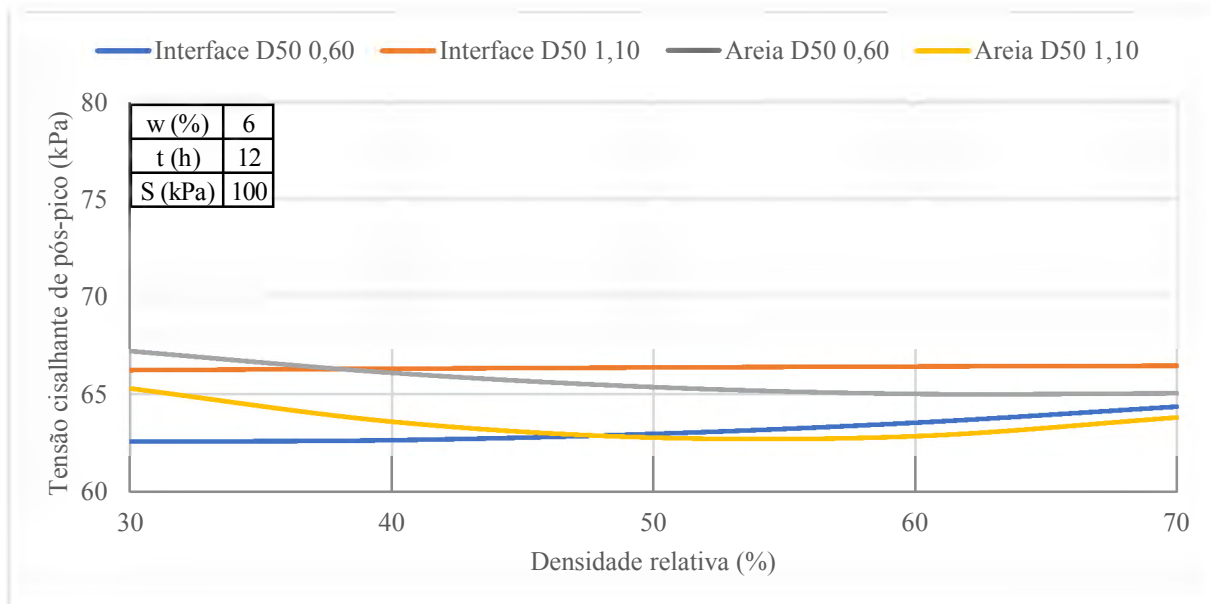


Fonte: O autor.

Na sequência foram analisados os efeitos da umidade na tensão de pico (Figura 96) e de pós-pico (Figura 97). Primeiramente, percebe-se que os ensaios de interface apresentam para ambos os casos um comportamento decrescente, enquanto os de areia, crescente. Apesar de pequena, a tendência de crescimento da resistência para os ensaios de areia pura, bem como o comportamento parabólico visto em diversos casos, não condiz com os resultados esperados, de decréscimo da resistência com aumento da saturação do corpo de prova. A razão para a presença destas discrepâncias nas análises das variáveis densidade relativa e umidade pode estar

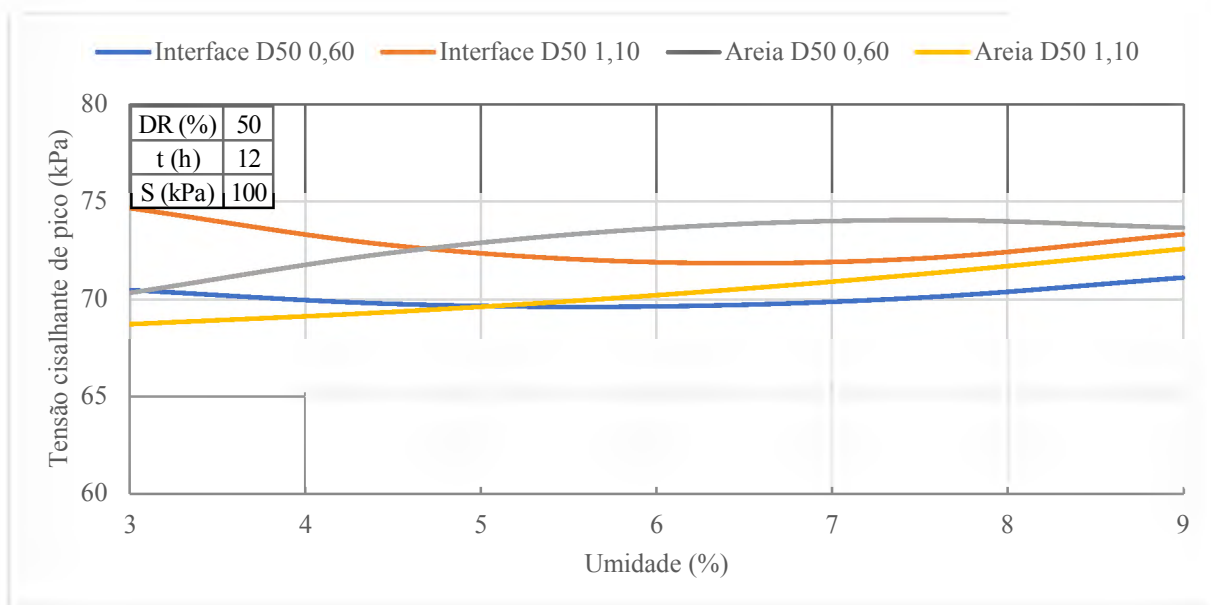
relacionada à variação experimental dos níveis fixos, que não foi considerada na RSM. Com relação aos valores de tensão cisalhante, observa-se a mesma situação da densidade relativa, com a areia média apresentando tensões superiores nos ensaios em areia, e a areia grossa nos de interface.

Figura 95 - Análise paramétrica da densidade relativa na tensão cisalhante de pós-pico



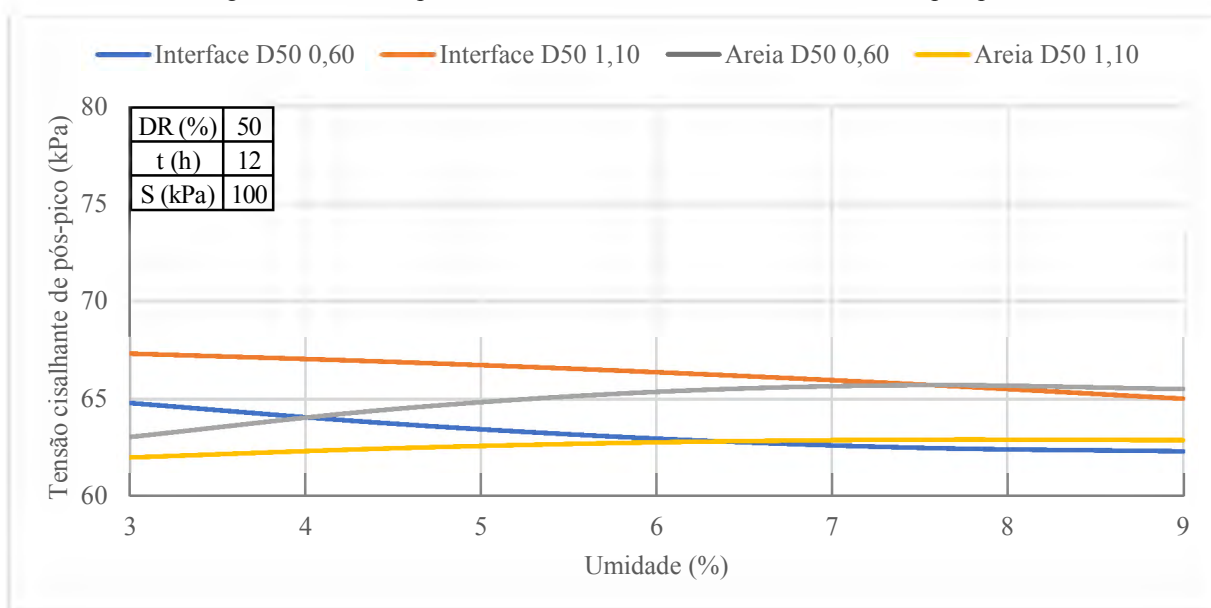
Fonte: O autor.

Figura 96 - Análise paramétrica da umidade na tensão cisalhante de pico



Fonte: O autor.

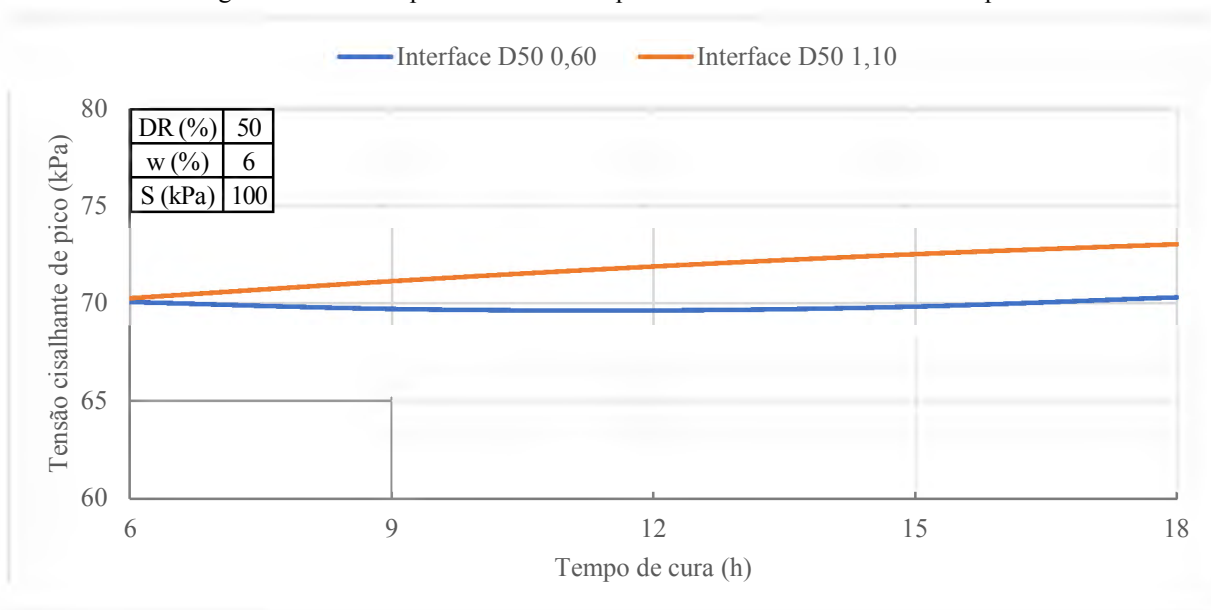
Figura 97 - Análise paramétrica da umidade na tensão cisalhante de pós-pico



Fonte: O autor.

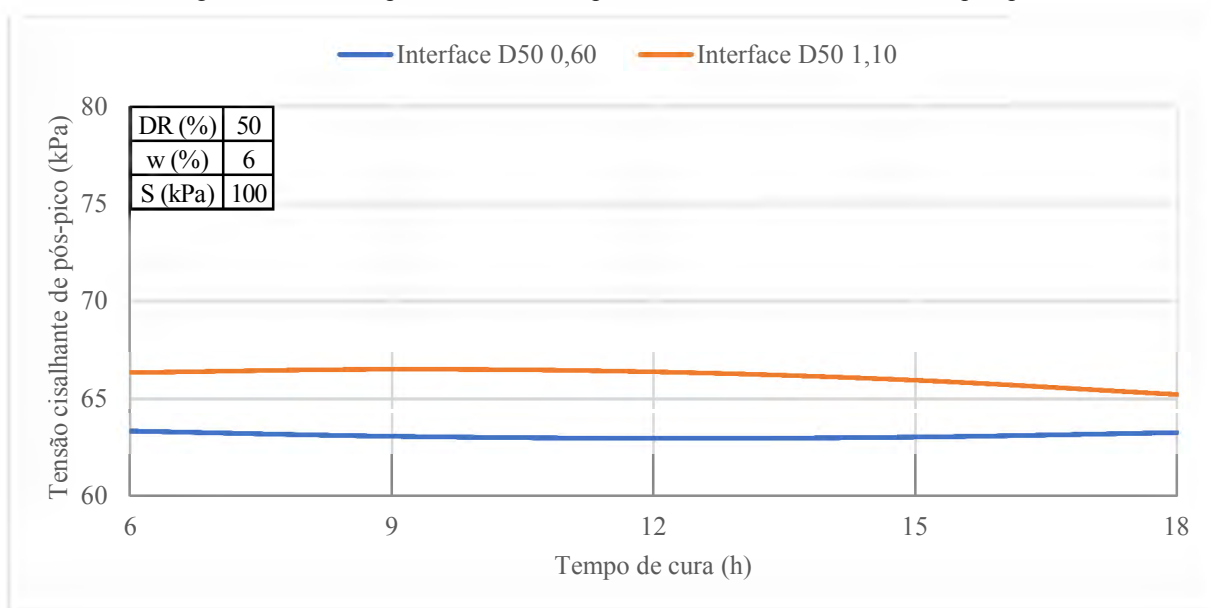
Nas curvas paramétricas envolvendo o tempo de cura foram apenas retratados os ensaios de interface, como pode ser visto na Figura 98 para a tensão de pico e na Figura 99 para a de pós-pico. A partir dos gráficos, nota-se um comportamento diferente para cada amostra, com a areia grossa apresentando um crescimento para a situação de pico e decréscimo na de pós-pico, enquanto a areia média possui um valor praticamente constante. Novamente, a taxa de variação dos parâmetros está relacionada à ANOVA, na qual o tempo de cura foi um parâmetro significativo apenas para a areia com D50 1,10 mm.

Figura 98 - Análise paramétrica do tempo de cura na tensão cisalhante de pico



Fonte: O autor.

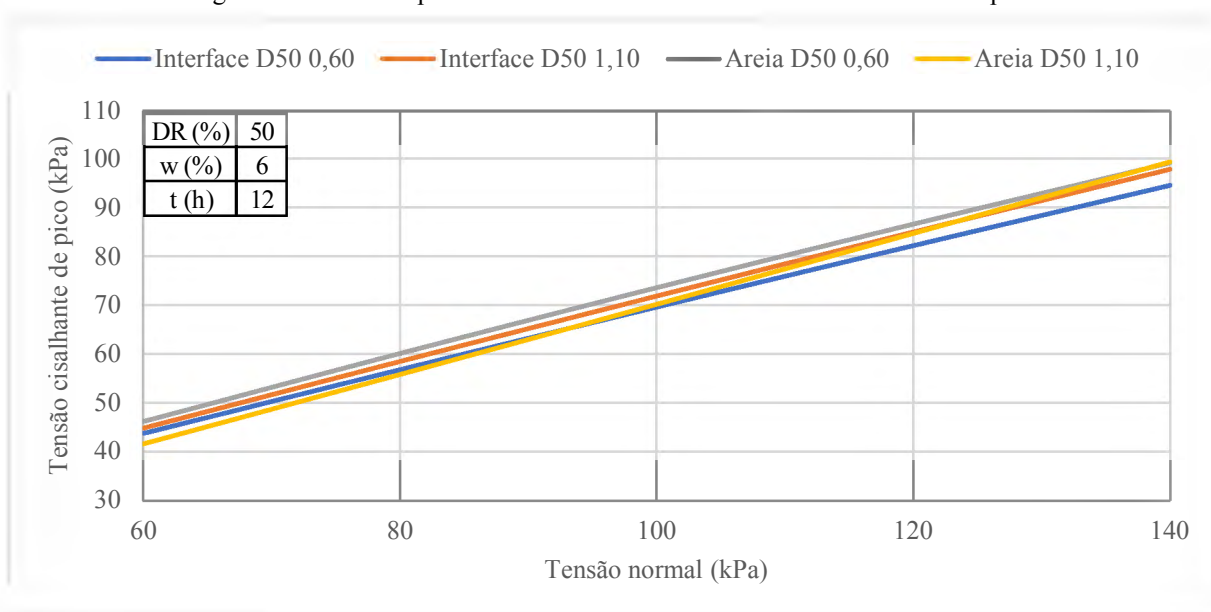
Figura 99 - Análise paramétrica do tempo de cura na tensão cisalhante de pós-pico



Fonte: O autor.

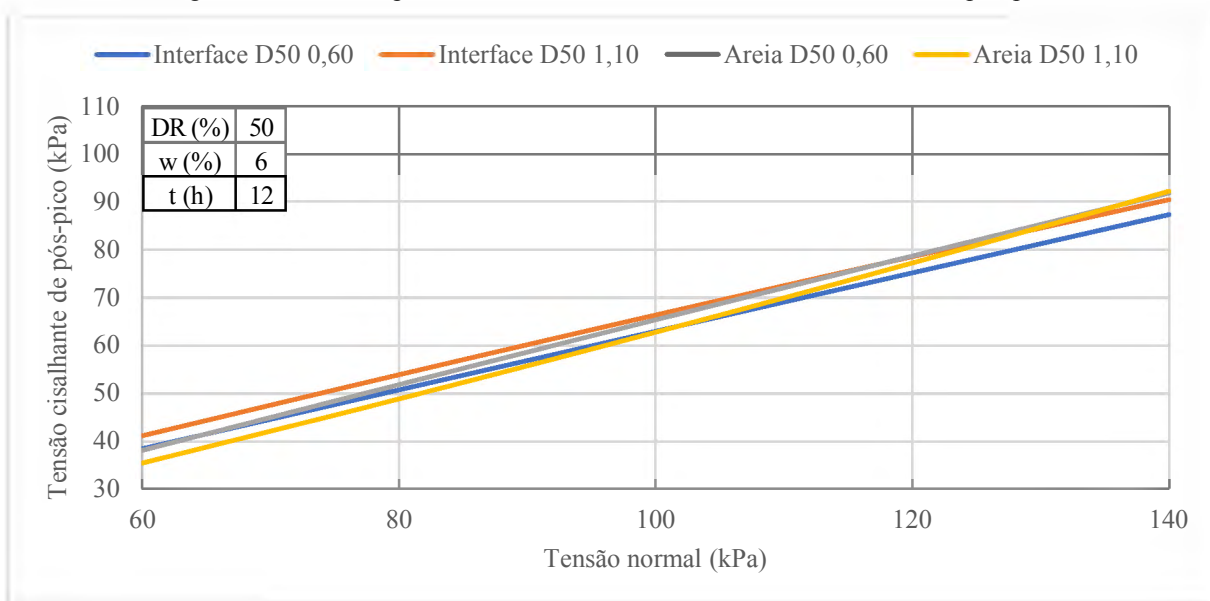
A última análise paramétrica foi referente à tensão normal, o fator mais significativo de todos modelos. Nos gráficos para tensão de pico (Figura 100) e de pós-pico (Figura 101) estão apresentadas as envoltórias médias de resistência ao cisalhamento para o intervalo de tensões normais do estudo. Nota-se que as curvas se cruzam em diversos pontos, indicando diferentes parâmetros de resistência entre os casos. Portanto, para avaliar como ocorre esta variação foram calculados os valores de ângulo de atrito e adesão, por meio das tensões cisalhantes obtidas através dos modelos para os mesmos níveis dos fatores utilizados no método fatorial cruzado.

Figura 100 - Análise paramétrica da tensão normal na tensão cisalhante de pico



Fonte: O autor.

Figura 101 - Análise paramétrica da tensão normal na tensão cisalhante de pós-pico



Fonte: O autor.

4.1.3.3 Parâmetros de resistência ao cisalhamento

A partir dos modelos da RSM foram então calculados os valores de adesão (c_a), ângulo de atrito da interface (δ), ângulo de atrito do solo (ϕ) e a razão entre os ângulos de atrito da interface e do solo (δ/ϕ) para as situações de pico (índice p) e de pós-pico (índice pp). O procedimento foi o mesmo adotado no item 4.1.2.2, resultando nos valores da Tabela 30.

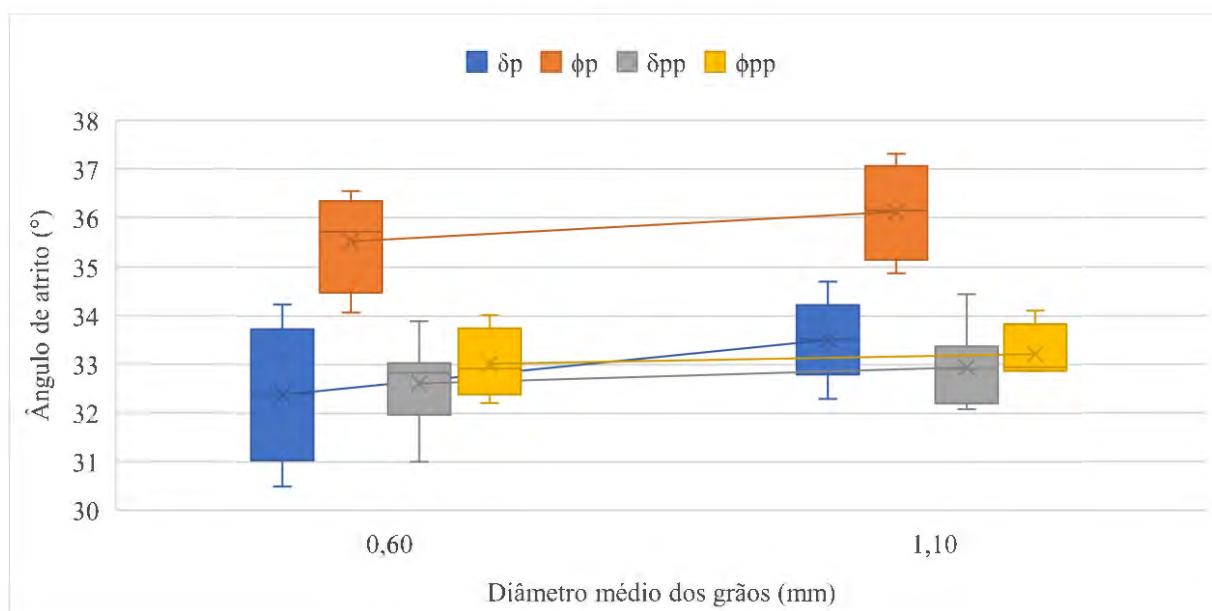
Tabela 30 - RSM: Parâmetros de resistência ao cisalhamento

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	cap (kPa)	δ_p	ϕ_p	$(\delta/\phi)_p$	δ_{pp}	ϕ_{pp}	$(\delta/\phi)_{pp}$
0,60	30	3	6	9,86	30,66	34,07	0,90	33,04	32,93	1,00
0,60	30	9	6	11,69	30,50	35,72	0,85	31,80	34,02	0,93
0,60	70	3	6	7,52	32,31	35,70	0,91	32,98	32,21	1,02
0,60	70	9	6	10,88	32,15	36,55	0,88	32,49	32,92	0,99
0,60	30	3	18	4,77	32,65	34,07	0,96	33,00	32,93	1,00
0,60	30	9	18	3,46	32,50	35,72	0,91	31,01	34,02	0,91
0,60	70	3	18	6,62	34,23	35,70	0,96	33,89	32,21	1,05
0,60	70	9	18	6,84	34,08	36,55	0,93	32,69	32,92	0,99
1,10	30	3	6	9,72	33,44	34,88	0,96	34,44	33,00	1,04
1,10	30	9	6	5,26	32,73	36,32	0,90	32,51	34,11	0,95
1,10	70	3	6	7,77	33,01	35,97	0,92	33,46	32,90	1,02
1,10	70	9	6	8,16	32,30	37,31	0,87	32,11	32,87	0,98
1,10	30	3	18	4,79	34,70	34,88	0,99	32,93	33,00	1,00
1,10	30	9	18	5,24	34,02	36,32	0,94	32,09	34,11	0,94
1,10	70	3	18	6,86	34,29	35,97	0,95	33,12	32,90	1,01
1,10	70	9	18	12,16	33,60	37,31	0,90	32,90	32,87	1,00

Fonte: O autor.

Conforme realizado para o fatorial cruzado, foi elaborado o gráfico *boxplot* (Figura 102) da variação dos ângulos de atrito para as duas amostras de areia. Os valores médios aproximados de adesão na interface no pico (cap), ângulo de atrito da interface de pico (δp), ângulo de atrito da interface de pós-pico (δpp), ângulo de atrito da areia de pico (ϕp) e ângulo de atrito da areia de pós-pico (ϕpp) foram, respectivamente, de 7,7 kPa, 32,4°, 32,6°, 35,5° e 33,0° para a areia média (D50 0,60 mm) e de 7,5 kPa, 33,5°, 33,0°, 36,1° e 33,2° para a areia grossa (D50 1,10 mm). Ainda, foram calculadas as razões entre os ângulos de atrito da interface e da areia, cuja média da amostra com D50 0,60 mm foi de 0,91 para o caso de pico e 0,99 para o de pós-pico, próximos aos de 0,93 e 0,99, respectivamente, para a areia com D50 1,10 mm.

Figura 102 - Influência do diâmetro médio dos grãos nos ângulos de atrito

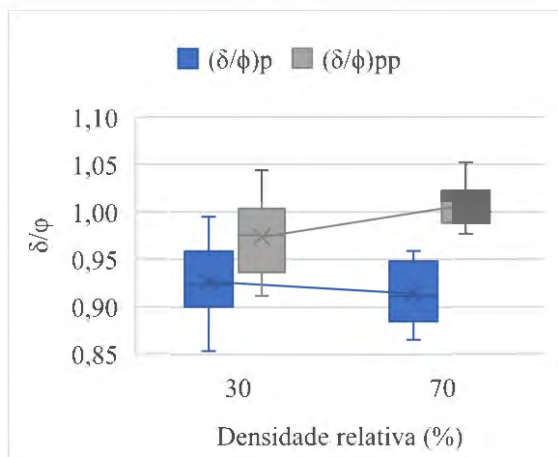


Fonte: O autor.

Com relação aos parâmetros obtidos através dos métodos fatorial cruzado e RSM, percebe-se que não ocorreram grandes alterações, sendo as diferenças máximas de cerca de 2° para os ângulos de atrito e de 6 kPa para a adesão. Nota-se ainda um comportamento muito semelhante ao da Figura 67, contudo, com uma melhor padronização da dispersão dos resultados, gerando uma mudança do efeito sobre o ângulo de atrito de pós-pico, que praticamente não se altera com o aumento do tamanho dos grãos. Outro ponto de melhora é visto nos valores de adesão, cujo conjunto mantém praticamente a mesma média (7,14 para o método fatorial contra 7,60 kPa da RSM), mas com uma distribuição mais coerente aos parâmetros variados em cada ensaio.

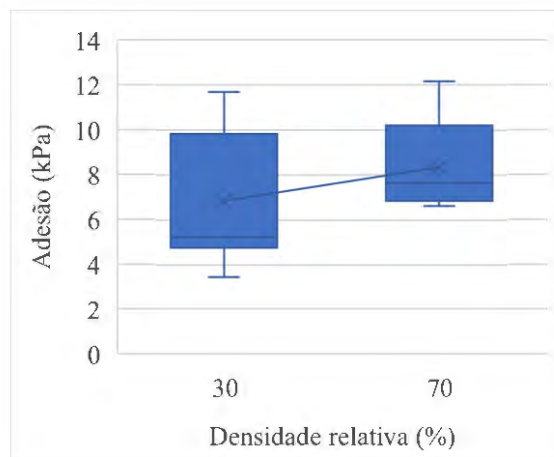
Para avaliar os efeitos dos fatores sobre as razões entre ângulos de atrito e adesão e compará-los aos obtidos para o fatorial cruzado, foram elaborados gráficos *boxplot* para cada variável: densidade relativa (Figura 103 e Figura 104), umidade (Figura 105 e Figura 106), tempo de cura (Figura 107 e Figura 108) e diâmetro médio dos grãos (Figura 109 e Figura 110).

Figura 103 - Influência da (DR) na (δ/ϕ)



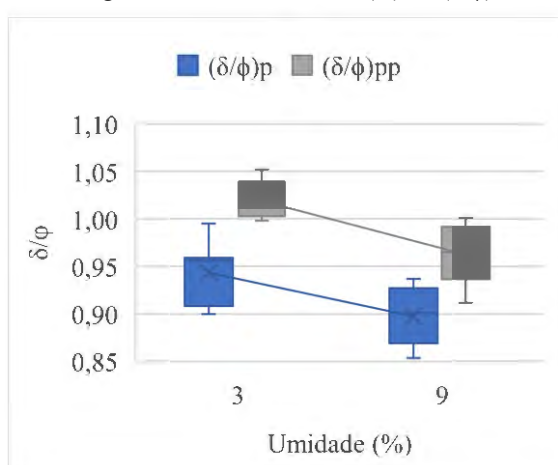
Fonte: O autor.

Figura 104 - Influência da (DR) na adesão



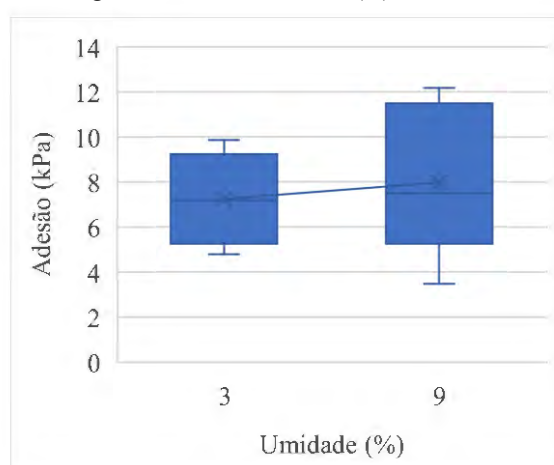
Fonte: O autor.

Figura 105 - Influência da (w) na (δ/ϕ)



Fonte: O autor.

Figura 106 - Influência da (w) na adesão

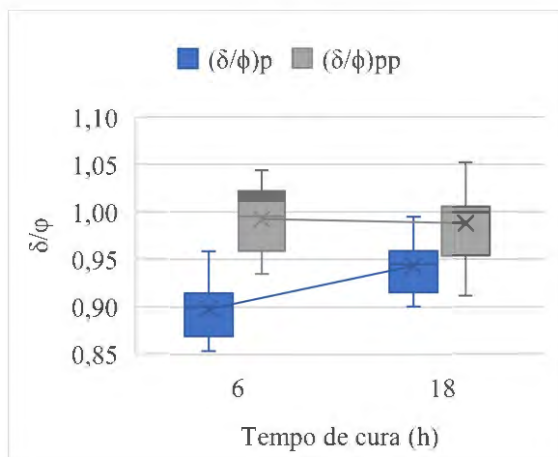


Fonte: O autor.

Novamente se percebe, em uma análise geral, que os resultados de razão entre ângulo de atrito de pós-pico são superiores aos de pico, fruto da não consideração da adesão. Além disso, destaca-se a maior precisão dos resultados, principalmente para os gráficos de adesão. Contudo, com relação ao comportamento da resposta, este é apenas semelhante ao caso do tempo de cura, trazendo diferenças em todos os outros. Para a densidade relativa é visto que um acréscimo no fator se reflete em uma maior adesão, sendo que a razão entre ângulos de atrito de pico permanece praticamente constante. Já na análise do gráfico da umidade, a principal diferença está na queda da razão entre ângulos de atrito de pós-pico com o acréscimo de

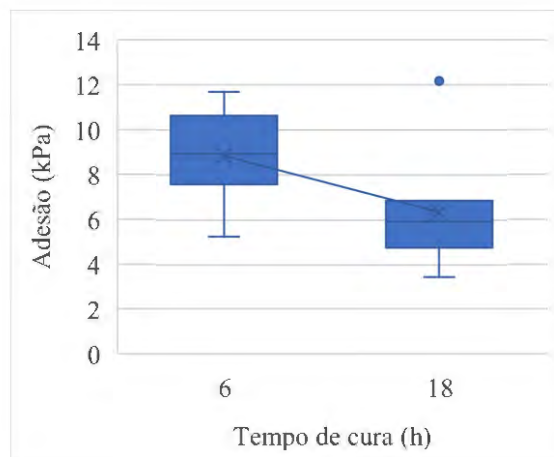
umidade. Ainda, exibe-se uma variação positiva da adesão com o aumento da umidade, algo que não aparecia através do fatorial cruzado. Por fim, para o diâmetro médio dos grãos ocorre a variação nas duas razões entre ângulos de atrito, com comportamento crescente para o caso pico e praticamente sem alteração para o pós-pico, o inverso do observado anteriormente.

Figura 107 - Influência do (t) na (δ/ϕ)



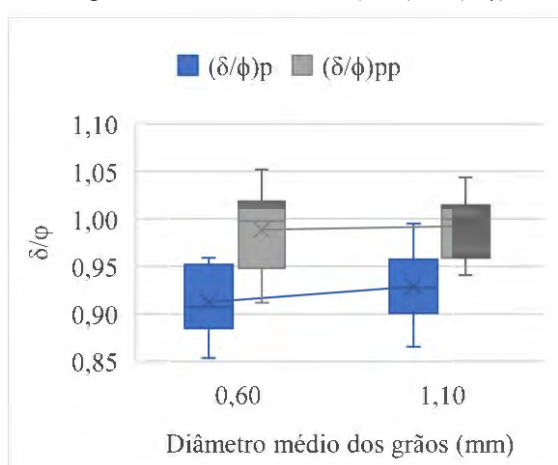
Fonte: O autor.

Figura 108 - Influência do (t) na adesão



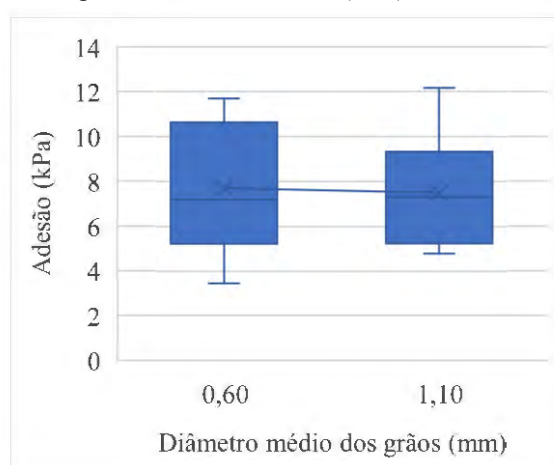
Fonte: O autor.

Figura 109 - Influência do (D50) na (δ/ϕ)



Fonte: O autor.

Figura 110 - Influência do (D50) na adesão



Fonte: O autor.

A partir dessa comparação entre os dois métodos se destaca a semelhança entre os valores de adesão e ângulos de atrito, demonstrando que ambos são satisfatórios para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Diferenças, contudo, ocorrem na influência dos fatores controláveis sobre as tensões cisalhantes, para os quais a RSM apresentou alguns comportamentos incoerentes com os indicados pela literatura, principalmente envolvendo as variáveis densidade relativa e umidade. Portanto, cabe à estudos futuros a elaboração de modelos matemáticos com níveis variáveis, de forma a eliminar possíveis erros envolvendo a preparação das amostras nos resultados.

4.2 RUGOSIDADE

4.2.1 Análise geral dos resultados

Conforme descrito no item 3.3.1, foram moldados 16 corpos de prova de concreto curado sob tensão, com suas superfícies impressas pelos grãos da areia. Para cada um destes foram realizadas 5 leituras de perfis de rugosidade, em diferentes posições da superfície, com 25 mm de comprimento. Os resultados dos ensaios estão dispostos no Apêndice 3 deste trabalho, no qual constam, para cada corpo de prova, 5 perfis de rugosidade, bem como os valores de rugosidade média (R_a), rugosidade máxima (R_{max}), rugosidade máxima média (R^*_{max}) e rugosidade normalizada (R_n e R^*_n) obtidos através deles.

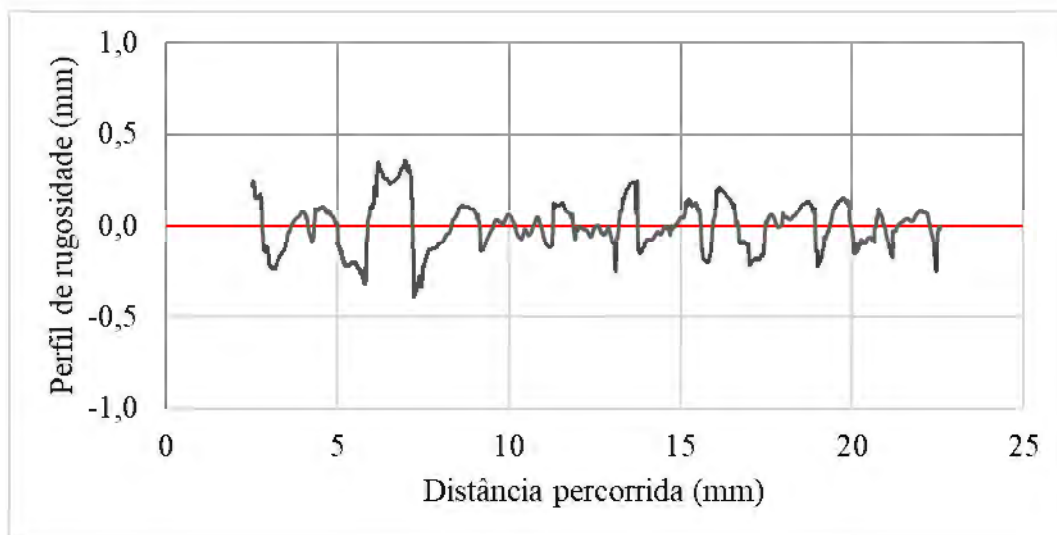
A existência de dois valores de rugosidade normalizada advém das duas formas de cálculo dos parâmetros, vistas no item 2.3.5. Neste trabalho a razão entre R_{max} e D_{50} foi denominada R_n , enquanto que a razão R^*_{max} por D_{50} de R^*_n . Destaca-se, contudo, a maior confiabilidade do parâmetro R^*_{max} , que é formado através da média de diversas diferenças entre picos e vales dentro de um comprimento de leitura de D_{50} , enquanto que o valor R_{max} compreende apenas a maior dessas distâncias, ou seja, mais susceptível a influência de *outliers*. Por fim, como os valores de rugosidade normalizada são decorrência direta desses parâmetros, são aplicadas as mesmas conclusões na comparação entre R_n e R^*_n .

Para a análise geral das curvas provenientes dos ensaios de rugosidade, foram escolhidos dois gráficos que exemplificam as variações encontradas nos resultados experimentais: D_{50} 0,60 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 100 kPa - Posição A (Figura 111) e D_{50} 1,10 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 100 kPa - Posição A (Figura 112).

No eixo horizontal dos gráficos está a distância percorrida pelo sensor do equipamento, originalmente de 25 mm, mas reduzida para 20 mm com o *cut-off* de 2,5 mm aplicado nas extremidades. Na Figura 112 se notam picos e vales mais profundos e frequentes que na Figura 111, em virtude apenas do diâmetro médio dos grãos, único fator que diferencia as duas amostras. Com relação aos parâmetros obtidos nesses dois exemplos, tem-se para a areia com D_{50} 0,60 mm os valores de $R_a = 0,103$ mm, $R_{max} = 0,774$ mm, $R^*_{max} = 0,236$ mm, $R_n = 1,290$ e $R^*_n = 0,393$, enquanto que para a areia com D_{50} 1,10 mm estes foram de $R_a = 0,136$ mm, $R_{max} = 0,945$ mm, $R^*_{max} = 0,429$ mm, $R_n = 0,859$ e $R^*_n = 0,390$. Com base nesses valores é possível concluir que o perfil da areia grossa é mais rugoso, devido à rugosidade média, rugosidade máxima e rugosidade máxima média serem superiores. Além

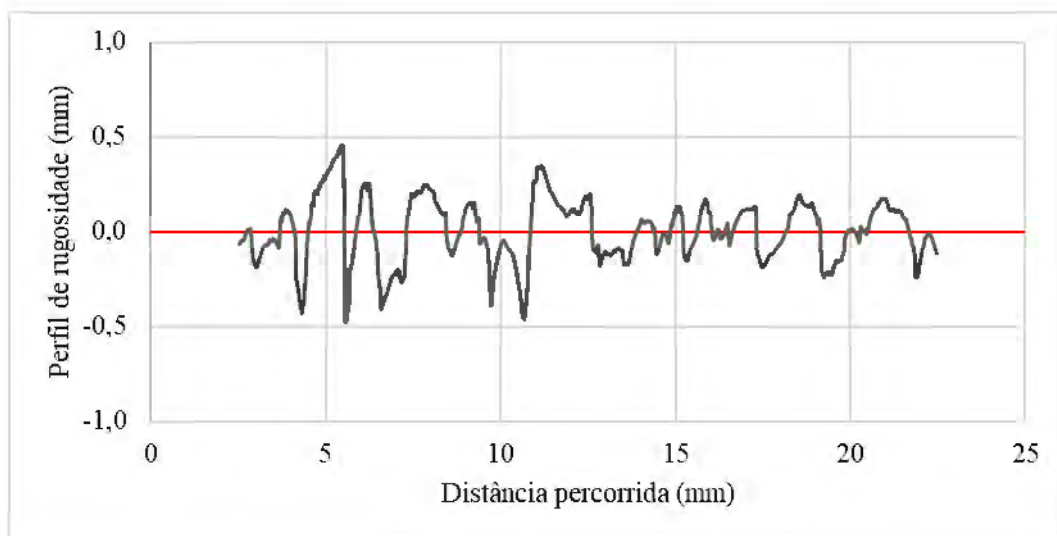
disso, a diferença entre os valores de R^*_{max} dos dois ensaios é proporcionalmente maior ao de R_{max} , indicando, mais uma vez, a diferença entre os dois casos.

Figura 111 - D50 0,60 mm - DR 70% - w 9% - S 100 kPa - Posição A



Fonte: O autor.

Figura 112 - D50 1,10 mm - DR 70% - w 9% - S 100 kPa - Posição A



Fonte: O autor.

Para o exemplo avaliado anteriormente se notou a influência do fator diâmetro médio dos grãos, contudo, é necessário confirmar se isto ocorre para os demais corpos de prova, bem como determinar a influência das outras variáveis: tensão normal, densidade relativa e umidade. Portanto, conforme indicado no item 3.3.2, foram feitas duas análises complementares: fatorial cruzado e fatorial 2k.

4.2.2 Fatorial cruzado

Para o método fatorial cruzado foram utilizados 10 corpos de prova de concreto curado sob tensão, com a variação de 5 tensões normais para as 2 amostras de areia, mantendo-se constante os valores de densidade relativa e umidade. Como cada corpo de prova fornece 5 leituras, obteve-se 50 valores para cada uma das respostas do ensaio, cuja média em cada caso pode ser vista na Tabela 31.

Tabela 31 - Fatorial cruzado: Parâmetros de rugosidade médios

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	S (kPa)	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	70	9	20	0,089	0,645	0,216	1,076	0,360
			60	0,088	0,647	0,217	1,078	0,361
			100	0,099	0,803	0,228	1,339	0,380
			140	0,088	0,571	0,214	0,952	0,357
			180	0,099	0,781	0,238	1,302	0,396
1,10	70	9	20	0,113	0,969	0,356	0,881	0,324
			60	0,118	0,841	0,378	0,765	0,344
			100	0,120	0,938	0,392	0,852	0,356
			140	0,110	0,916	0,384	0,833	0,349
			180	0,096	0,741	0,311	0,674	0,283

Fonte: O autor.

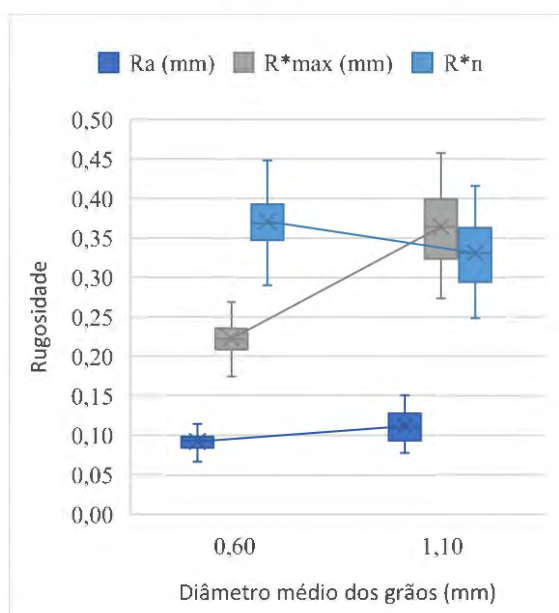
Para avaliar a influência de cada fator foram elaborados gráficos *boxplot* contendo todas as respostas dos ensaios. Devido às diferentes escalas dos resultados, agrupou-se as análises em dois gráficos por fator, o primeiro contendo os valores obtidos por meio de médias: Ra, R*max e R*n, enquanto o segundo os valores máximos: Rmax e Rn.

O primeiro fator analisado foi o diâmetro médio dos grãos, que na Figura 113 apresentou comportamento crescente para a Ra e R*max e decrescente para R*n, semelhante ao encontrado na Figura 114, com uma reta crescente para Rmax e decrescente para Rn. Com relação a dispersão, nota-se para as respostas da Figura 113 uma maior precisão quando utilizada a areia média, efeito contrário ao observado na Figura 114, que conta com a presença de *outliers* para esse nível de variação. Destaca-se, ainda, que a dispersão da rugosidade normalizada é proporcional à proveniente da rugosidade máxima, pois a resposta advém de uma divisão desta pela tensão normal.

O outro fator analisado foi a tensão normal, apresentada na Figura 115 para os valores médios de rugosidade e na Figura 116 para os máximos. O comportamento foi levemente parabólico para o caso da Figura 115, com o ápice na tensão de 100 kPa. Já na Figura 116

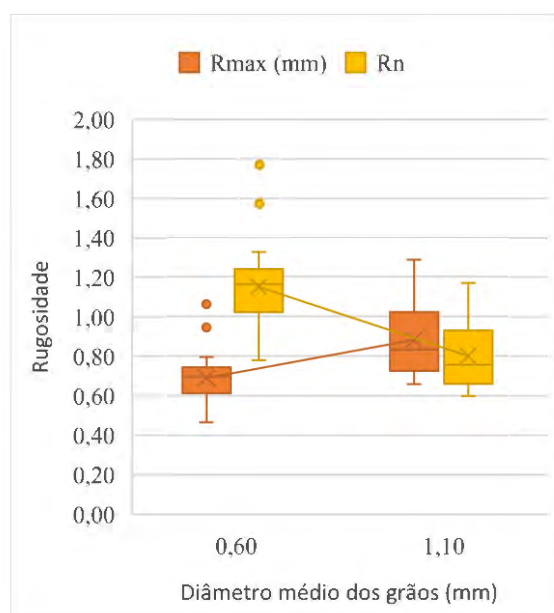
ocorreu uma leve variação dos resultados em torno da média. Com base nesses comportamentos e na magnitude da diferença entre as médias, concluiu-se que a tensão normal não é um parâmetro significativo para a variação dos resultados. Com relação à dispersão, nota-se um comportamento inverso entre os valores de R^*_{max} e R^*_n e entre R_{max} e R_n . Esse efeito ocorre provavelmente em virtude da normalização do efeito da variável diâmetro médio dos grãos, que ocasiona a dispersão dentro dos níveis de tensão normal.

Figura 113 - Influência do diâmetro médio dos grãos na rugosidade média



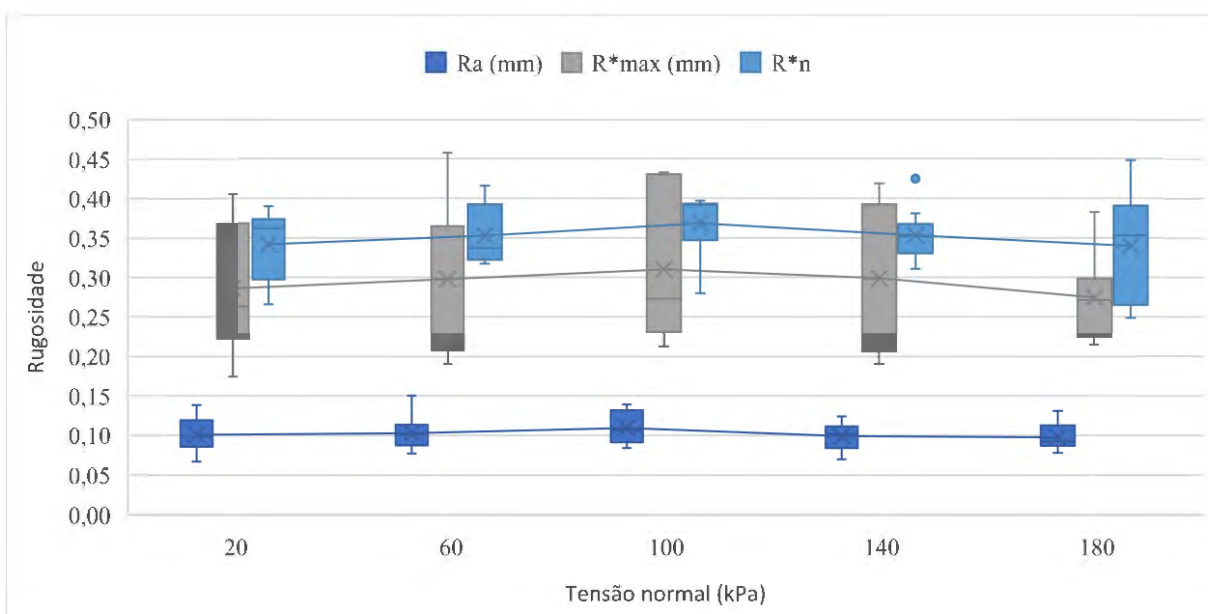
Fonte: O autor.

Figura 114 - Influência do diâmetro médio dos grãos na rugosidade máxima



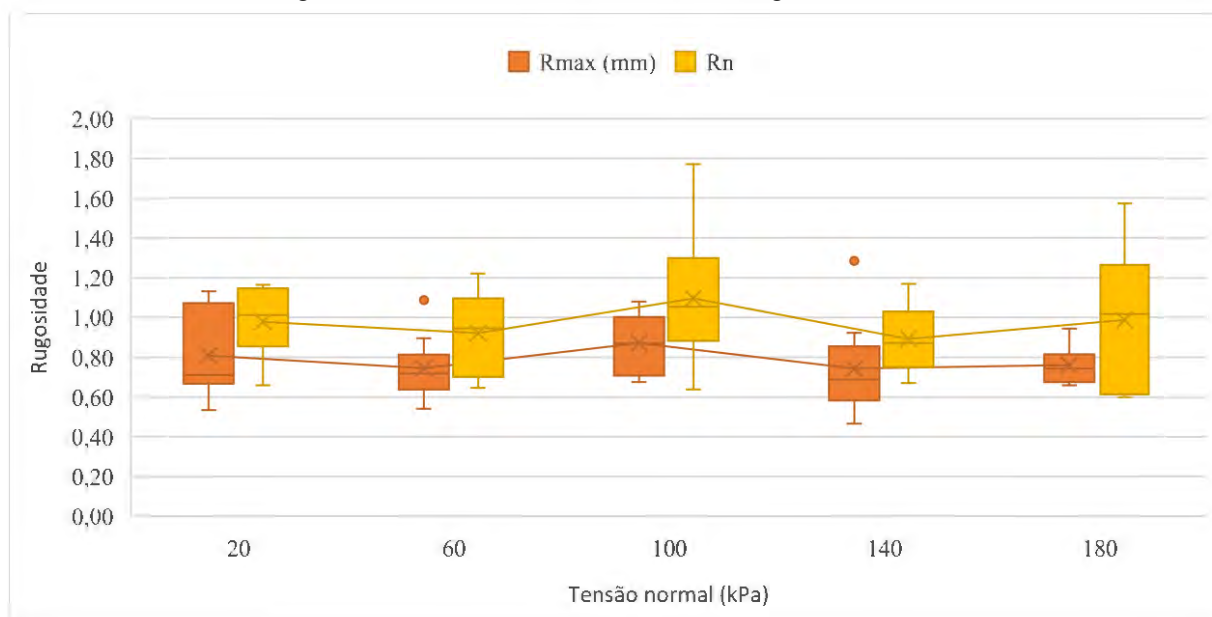
Fonte: O autor.

Figura 115 - Influência da tensão normal na rugosidade média



Fonte: O autor.

Figura 116 - Influência da tensão normal na rugosidade máxima



Fonte: O autor.

4.2.3 Fatorial 2k

A segunda ferramenta estatística utilizada para avaliação da rugosidade foi o método fatorial 2k, de ordem 3, que consiste na variação de 3 parâmetros em dois níveis. Os fatores de controle escolhidos foram o diâmetro médio dos grãos, a densidade relativa e a umidade, mantendo-se, para todos os casos, a tensão normal constante em 100 kPa. Para essa verificação foram utilizados 8 corpos de prova de concreto curado sob tensão, sendo 2 provenientes do método fatorial cruzado. Portanto, foram geradas 40 respostas para cada fator, a partir dos quais foi elaborada a Tabela 32, com seus valores médios para cada caso.

Tabela 32 - Fatorial 2k: Parâmetros de rugosidade

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	S (kPa)	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	30	3	100	0,100	0,793	0,240	1,322	0,400
		9		0,101	0,706	0,242	1,177	0,404
	70	3		0,095	0,691	0,229	1,152	0,381
		9		0,099	0,803	0,228	1,339	0,380
1,10	30	3	100	0,108	0,759	0,350	0,690	0,318
		9		0,114	0,881	0,379	0,801	0,345
	70	3		0,118	0,911	0,394	0,828	0,358
		9		0,120	0,938	0,392	0,852	0,356

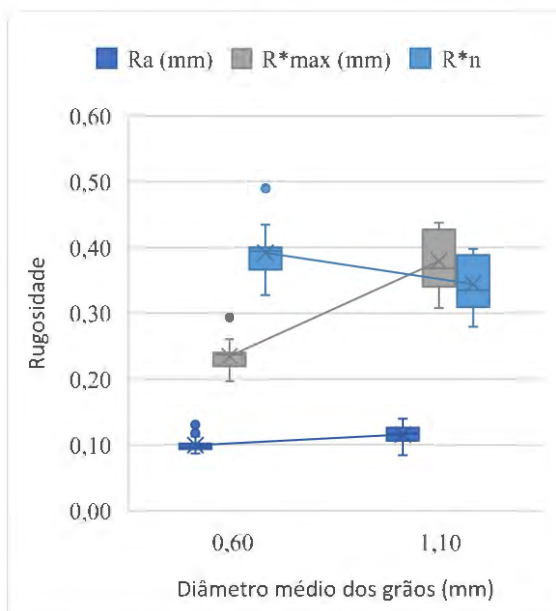
Fonte: O autor.

Novamente, o primeiro fator analisado foi o diâmetro médio dos grãos, através da Figura 117 e da Figura 118. O comportamento observado para as respostas foi exatamente o mesmo

da análise anterior, indicando uma consistência nos resultados. Nota-se, todavia, um número maior de *outliers*, principalmente para o diâmetro médio dos grãos de 0,60 mm, além destes possuírem valores mais elevados. Na avaliação seguinte, apresentada na Figura 119 e na Figura 120, o parâmetro densidade relativa não ocasionou praticamente nenhuma variação nas respostas, indicando sua não influência nos valores de rugosidade. Um comportamento análogo a este é visto nos gráficos referentes à umidade (Figura 121 e Figura 122), nos quais também não é percebido o efeito sobre os resultados provenientes dos ensaios. Ainda, vale destacar que nos quatro últimos gráficos é percebido o comportamento de inversão da dispersão entre R^*_{max} e R^*_n e entre R_{max} e R_n , em virtude da normalização da rugosidade.

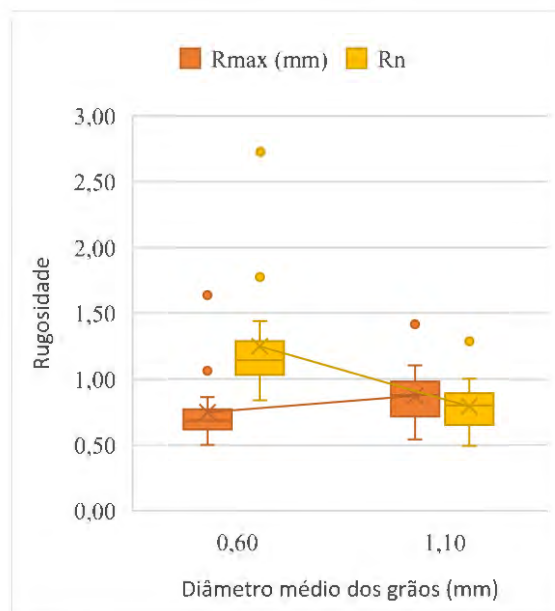
Por fim, concluiu-se que é possível atribuir um valor médio dos parâmetros de rugosidade apenas em função do diâmetro médio dos grãos de areia, sem precisar levar em conta a variação dos níveis dos outros fatores controláveis do presente trabalho. Assim, para a areia média (D50 0,60 mm) o valor médio de R_n é 1,149 e o de R^*_n de 0,371, enquanto que para a areia grossa (D50 1,10 mm), os valores de R_n e R^*_n são, respectivamente, 0,801 e 0,331. Uma das formas de caracterizar essas superfícies foi definida por Paikowsky *et al.* (1995), através do valor de R_n , que considera a superfície rugosa para valores superiores a 0,5.

Figura 117 - Influência do diâmetro médio dos grãos na rugosidade média



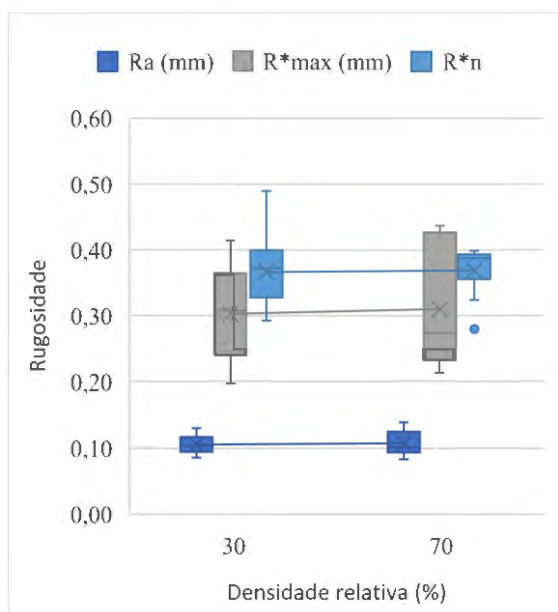
Fonte: O autor.

Figura 118 - Influência do diâmetro médio dos grãos na rugosidade máxima



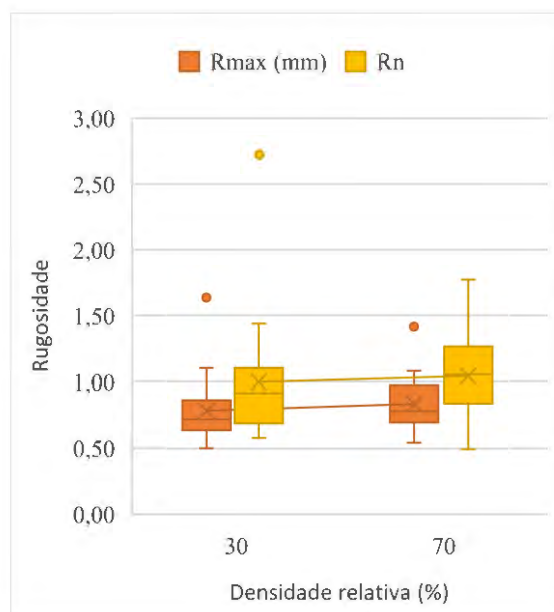
Fonte: O autor.

Figura 119 - Influência da densidade relativa na rugosidade média



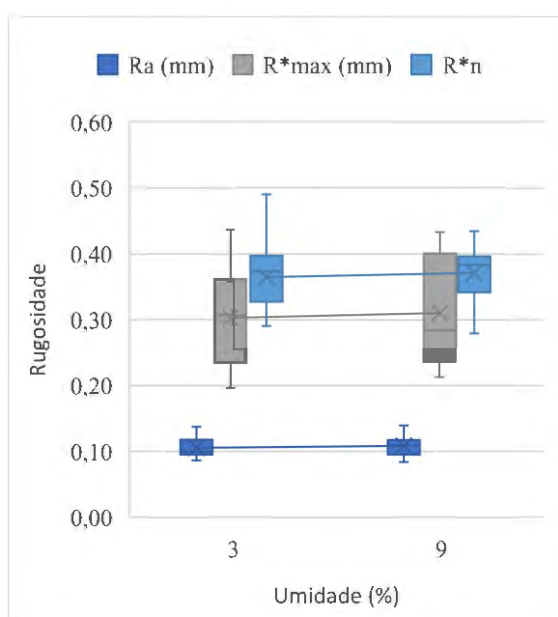
Fonte: O autor.

Figura 120 - Influência da densidade relativa na rugosidade máxima



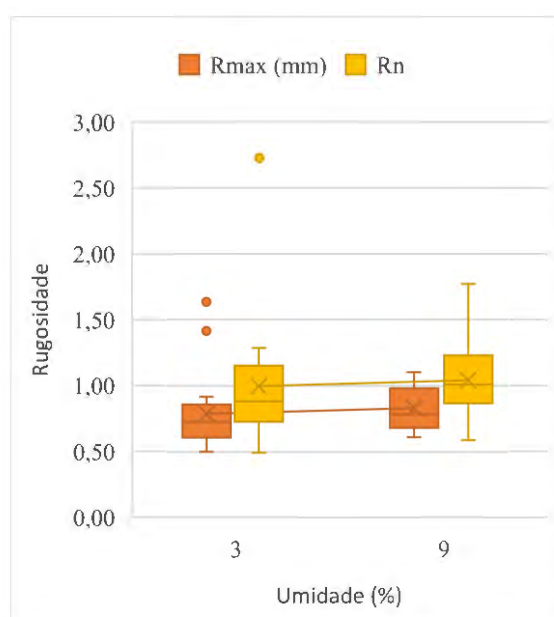
Fonte: O autor.

Figura 121 - Influência da umidade na rugosidade média



Fonte: O autor.

Figura 122 - Influência da umidade na rugosidade máxima



Fonte: O autor.

4.3 SUPERFÍCIE DE CISALHAMENTO

Outro objetivo do presente estudo foi observar como ocorre a superfície de ruptura durante o ensaio de cisalhamento direto. Para obter essa resposta foram realizadas medições do deslocamento vertical da areia sobre o concreto curado sob tensão e comparações entre as

superfícies de ruptura para diferentes alturas de concreto no molde. A determinação do deslocamento da areia sobre o concreto curado sob tensão foi feita através da diferença entre os valores de deslocamento vertical máximo ocorridos em ensaios de areia e de interface. Os fatores controláveis e níveis de variação foram descritos no item 3.4.1, cujos resultados foram agrupados na Tabela 33.

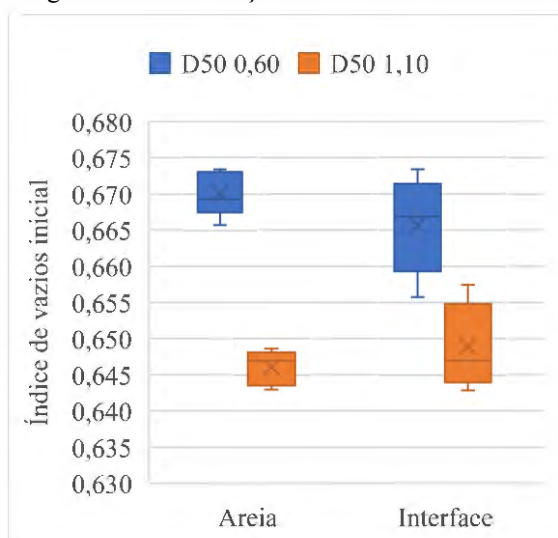
Tabela 33 - Resultados das medições de deslocamento vertical

		σ (kPa)	e_0	w_0 (%)	w_f (%)	dv máximo (mm)	dv concreto (mm)
D50 0,60 mm - DR 70 %- W 9 %	Areia	20	0,67	8,85	8,64	0,137	0,166
	Interface		0,66	8,98	8,37	0,303	
	Areia	60	0,67	8,85	8,45	0,370	0,158
	Interface		0,66	8,47	8,59	0,528	
	Areia	100	0,67	8,56	7,57	0,512	0,371
	Interface		0,67	8,67	8,50	0,883	
Areia	140	0,67	9,02	8,39	0,968	0,158	
Interface		0,67	8,89	8,90	1,126		
Areia	180	0,67	9,01	8,54	0,785	0,462	
Interface		0,67	9,12	9,70	1,247		
D50 1,10 mm - DR 70 %- W 9 %	Areia	20	0,65	8,83	7,98	0,161	0,067
	Interface		0,65	8,93	8,50	0,228	
	Areia	60	0,64	8,71	8,28	0,413	0,261
	Interface		0,64	8,71	8,04	0,674	
	Areia	100	0,64	8,65	8,03	0,624	0,482
	Interface		0,65	8,78	8,43	1,106	
Areia	140	0,65	8,87	8,17	0,894	0,161	
Interface		0,66	9,29	8,46	1,055		
Areia	180	0,65	8,98	7,99	0,699	0,385	
Interface		0,65	9,04	7,92	1,084		

Fonte: O autor.

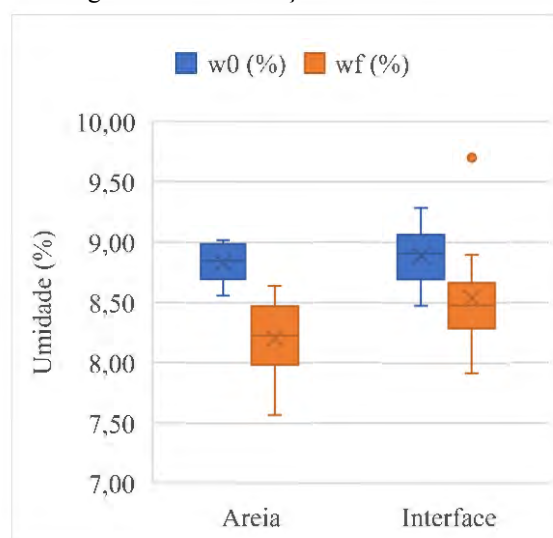
A primeira medida obtida foi o índice de vazios inicial (e_0), cuja análise *boxplot* é apresentada na Figura 123, utilizado para o controle da similaridade entre os ensaios de areia e interface. Nesse caso, nota-se a grande semelhança entre as médias, com diferença de apenas 0,05. Contudo, percebe-se uma maior variação nos valores dos ensaios em interface. Outro resultado inicial avaliado é a umidade (Figura 124), na qual se nota praticamente a mesma média inicial (w_0) para os ensaios de areia e interface. Além disso, é possível inferir que apesar de ambas as médias da umidade final (w_f) ficarem abaixo da inicial, os ensaios em interface obtiveram valores maiores, indicando que absorvem uma porção da água presente no concreto, mas não o suficiente para compensar a perda durante as 24 h de ensaio.

Figura 123 - Diferença entre os índices de vazios



Fonte: O autor.

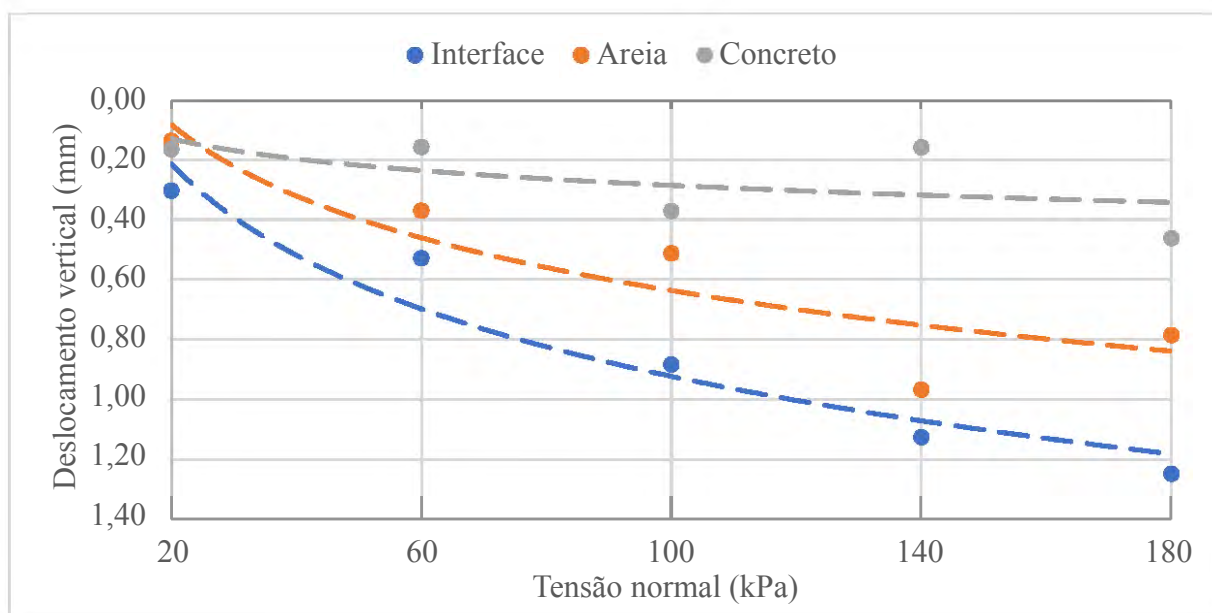
Figura 124 - Diferença entre as umidades



Fonte: O autor.

Os principais resultados, todavia, são referentes aos valores de deslocamento vertical máximo do concreto curado sob tensão obtidos em cada ensaio. Para melhor visualização, foram plotados gráficos deslocamento vertical x tensão normal, sendo apresentado na Figura 125 o da areia com D50 0,60 mm, e na Figura 126 o para o caso D50 1,10 mm.

Figura 125 - Deslocamento vertical dos ensaios de areia média (D50 0,60 mm)

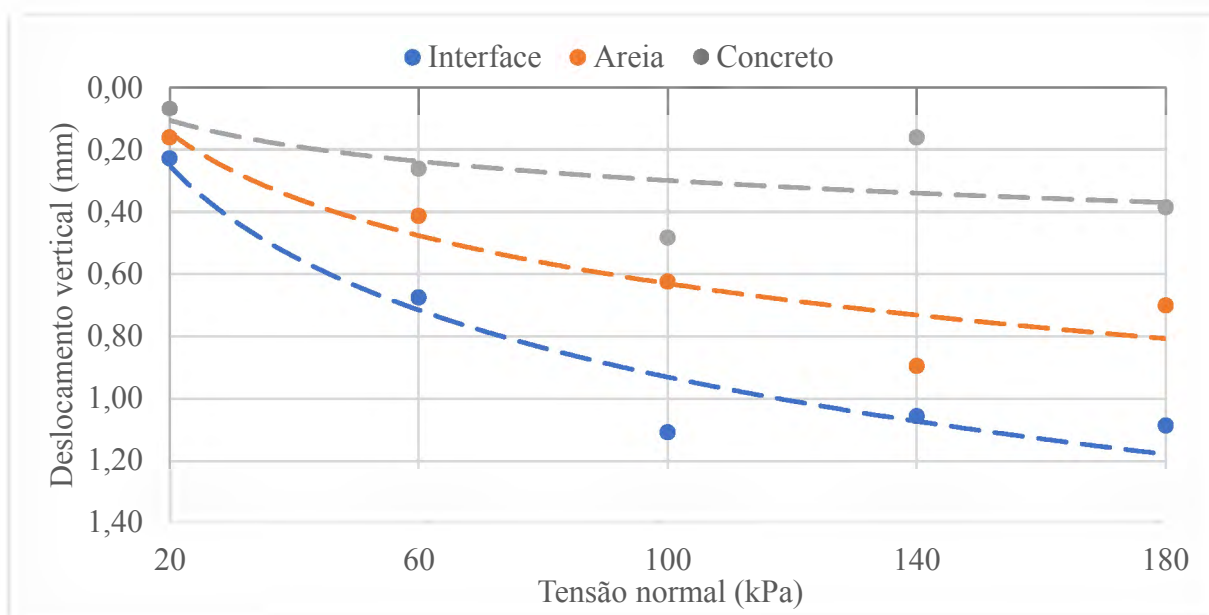


Fonte: O autor.

Devido à elevada dispersão dos resultados, utilizou-se uma linha de tendência logarítmica para melhor entendimento do comportamento da curva. A premissa da avaliação é de que o deslocamento vertical da areia em ambos os ensaios deveria ser o mesmo, já que foram executados praticamente os mesmos índices de vazios e umidades iniciais. Entretanto, é

observado nos gráficos que maiores deslocamentos ocorrem nos ensaios de interface, cuja causa pode estar relacionada a um movimento de retração da superfície do concreto e na penetração da areia na massa de concreto fresco. Esse deslocamento apresenta um comportamento de crescimento com a tensão normal, sem elevadas diferenças entre as amostras de areia média e grossa. Como valor de referência, pode-se notar o deslocamento de cerca de 0,30 mm para uma tensão de 100 kPa em ambas as amostras.

Figura 126 - Deslocamento vertical dos ensaios da areia grossa (D50 1,10 mm)



Fonte: O autor.

Seguindo para a análise da superfície de ruptura, foram realizados quatro ensaios de cisalhamento direto em interface com variações do tempo de cura (t) e do nível do concreto (z), cujos fatores controláveis e níveis foram descritos no item 3.4.1. Os fatores medidos em cada ensaio podem ser vistos na Tabela 34, sendo eles a densidade relativa inicial (DR_0), a umidade inicial (w_0), a umidade final (w_f) e as diferenças entre a densidade relativa proposta e a obtida (ΔDR), entre a umidade planejada e a real (Δw) e entre a umidade final e inicial do ensaio ($w_f - w_0$). Da análise dessas medidas, nota-se que a densidade relativa inicial foi superior à calculada, contudo, sua variação foi de 4,81 a 8,72 %, sendo o valor considerado aceitável para realizar a comparação entre os ensaios. A umidade inicial, por sua vez, assumiu valores inferiores aos estipulados, todavia, com baixíssima variação, indo de 0,17 a 0,44 %. Por fim, a diferença entre a umidade final e inicial do ensaio demonstrou maiores variações para os ensaios com tempo de cura de 15 h. Além disso, nota-se um acréscimo de umidade para os ensaios com nível zero para o concreto, enquanto os ensaios de nível -2 mm sofreram uma redução.

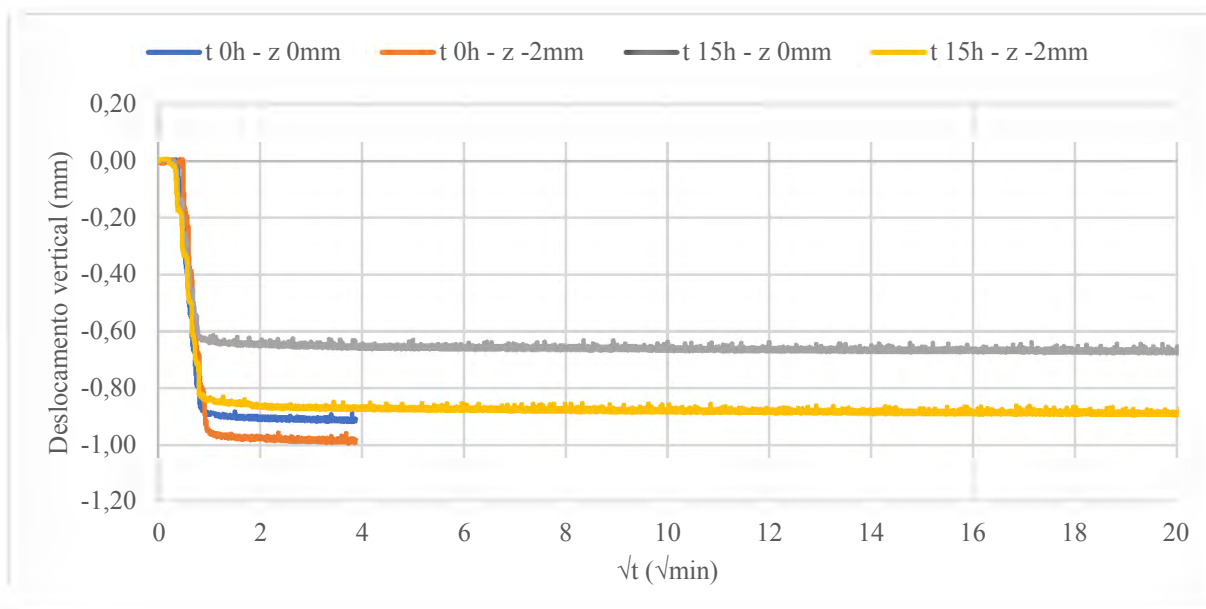
Tabela 34 - Medição dos fatores controláveis do ensaio de cisalhamento direto

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	σ (kPa)	t (h)	z (mm)	DR0 (%)	Δ DR (%)	w0 (%)	Δ w (%)	wf (%)	wf-w0 (%)
1,10	70	9	100	0	0	75,67	5,67	8,72	-0,28	8,76	0,04
					-2	74,81	4,81	8,83	-0,17	8,72	-0,11
				15	0	78,72	8,72	8,56	-0,44	9,02	0,46
					-2	77,55	7,55	8,66	-0,34	7,75	-0,91

Fonte: O autor.

Com a primeira etapa do ensaio de cisalhamento direto são obtidos os resultados dos deslocamentos verticais durante o período de cura sob tensão do concreto, apresentados na Figura 127. Para esse caso se percebe um maior deslocamento para os ensaios com tempo de cura 0 h, além de valores superiores para os ensaios com nível de concreto -2 mm. Esse fenômeno não era esperado entre os ensaios, pois como os corpos de provas de concreto curado sob tensão foram moldados com a mesma densidade relativa, era esperado o mesmo comportamento para uma tensão normal igual. Essa variação pode estar relacionada há algum espaçamento entre a tampa e a areia no conjunto, cuja variação observada em alguns casos foi de cerca de 0,5 mm.

Figura 127 - Deslocamentos verticais durante a cura do concreto



Fonte: O autor.

Após a etapa de estabilização dos deslocamentos verticais foram realizados os cisalhamentos em interface, cujos resultados estão apresentados na Tabela 35, nos quais constam a tensão cisalhante de pico (τ_p), a tensão cisalhante de pós-pico (τ_{pp}), o coeficiente de atrito de pico $[(\tau/\sigma)_p]$, o coeficiente de atrito de pós-pico $[(\tau/\sigma)_{pp}]$, o deslocamento horizontal

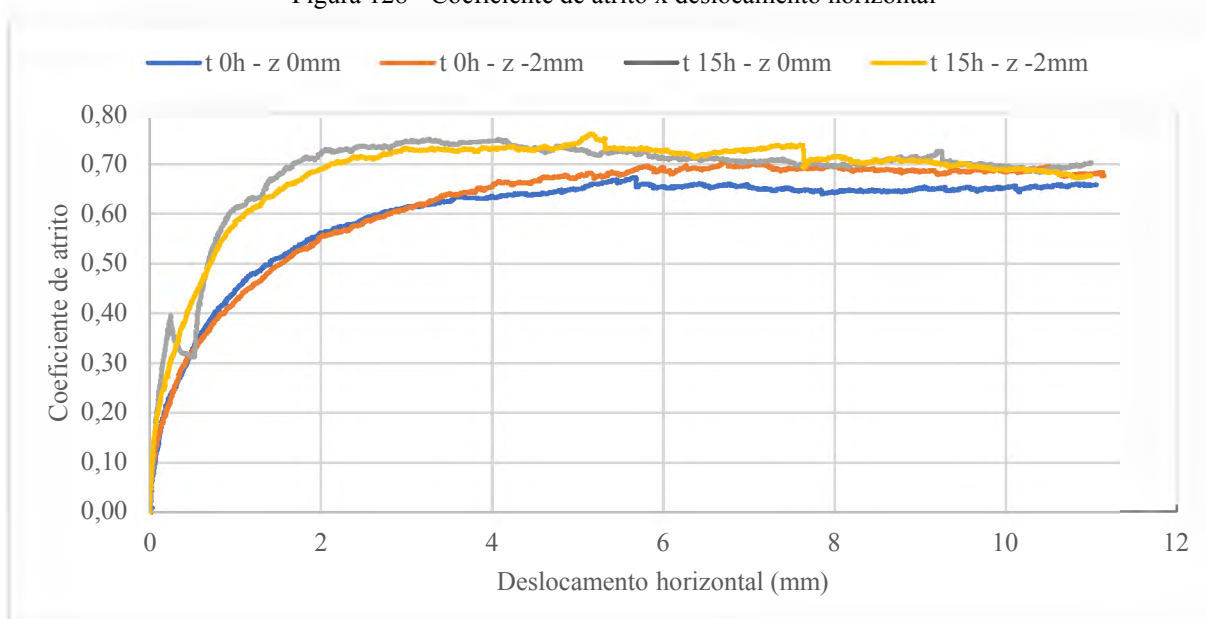
até o pico (dp) e o deslocamento até o pós-pico (dpp). Com relação aos valores da tensão de pico, nota-se um aumento relevante com o tempo de cura de 15 h e um leve acréscimo para o nível de concreto -2 mm. Os valores no pós-pico, por sua vez, são mais próximos e não se percebe um padrão entre os resultados. Contudo, para melhor compreender o comportamento do ensaio, pode-se analisar a curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal, apresentada na Figura 128.

Tabela 35 - Respostas do ensaio de cisalhamento direto

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	σ (kPa)	t (h)	z (mm)	τ_p (kPa)	τ_{pp} (kPa)	$(\tau/\sigma)_p$	$(\tau/\sigma)_{pp}$	dp (mm)	dpp (mm)
1,10	70	9	100	0	0	67,37	64,00	0,67	0,64	5,67	7,86
					-2	70,46	67,53	0,70	0,68	6,73	10,68
				15	0	75,02	68,30	0,75	0,68	3,25	10,38
					-2	76,08	67,16	0,76	0,67	5,13	10,84

Fonte: O autor.

Figura 128 - Coeficiente de atrito x deslocamento horizontal



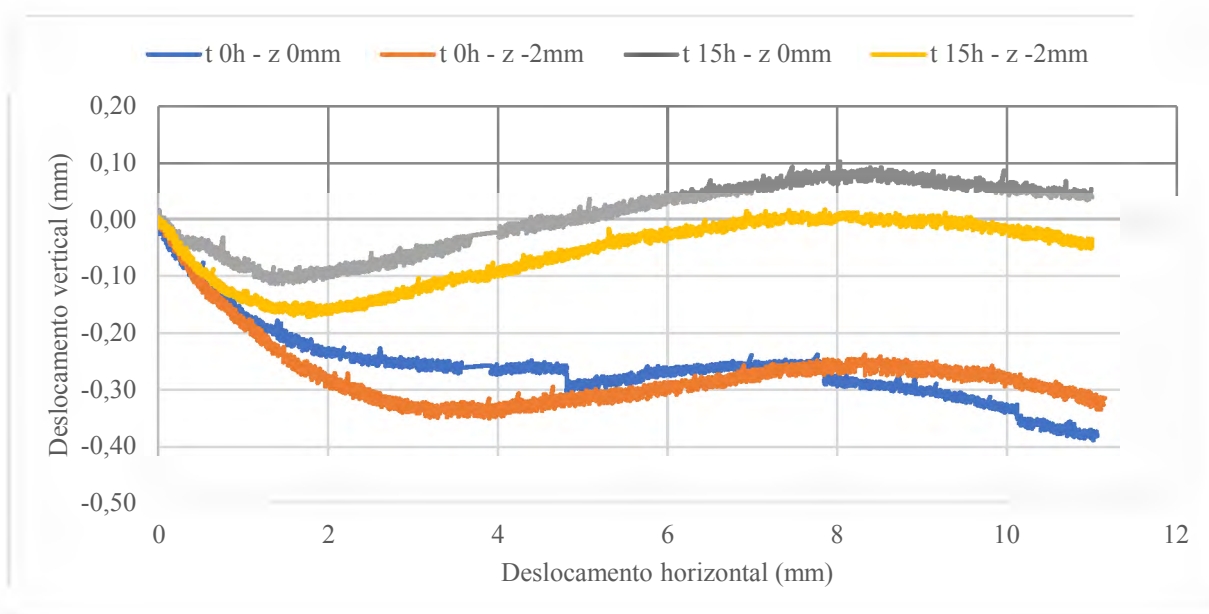
Fonte: O autor.

Na Figura 128 é possível visualizar um comportamento distinto entre os ensaios com tempo de cura 15 h e os de 0 h. No primeiro caso há uma maior rigidez inicial da curva que, depois de superada com o decorrer dos deslocamentos, encaminha-se a uma mesma posição de pós-pico para ambos os ensaios. Uma possível explicação para essa variação é a adesão causada pelo concreto curado sob tensão, que iniciou seu processo de cura com os grãos de areia impressos em sua superfície, sendo necessária a quebra dessa ligação para o avanço dos deslocamentos. Com relação a comparação entre os ensaios com diferentes níveis de concreto,

entretanto, não se nota um comportamento claro que indique uma diferença significativa entre os resultados, indicando que a superfície de ruptura ocorre numa superfície areia-areia, que foi o caso forçado com a redução do nível de concreto. Ressalva-se, todavia, que a areia que está sofrendo a ruptura é influenciada pelo concreto fresco que penetra na amostra, podendo ocasionar valores diferentes dos ensaios em areia pura.

Outro gráfico que auxilia no entendimento da superfície de cisalhamento é o de deslocamento vertical x deslocamento horizontal durante o cisalhamento, apresentado na Figura 129. Nesse caso também se nota um comportamento distinto entre os ensaios com tempo de cura 0 h e os de 15 h. Para o menor tempo é observado um comportamento de compressão volumétrica, apesar da densidade relativa na qual a amostra de areia foi moldada ser considerada compacta. Uma explicação para esse fato é que o concreto fresco não consegue oferecer resistência à tensão normal e ao movimento aplicados no ensaio, retraindo-se e dando lugar à areia, que forma uma fina camada de grão sobre sua superfície durante a ruptura. Nos ensaios com tempo de cura com 15 h, por outro lado, é apresentado um comportamento inicial de contração, seguido de dilatância com o decorrer dos deslocamentos, com variação final em torno de zero. Esse comportamento indica que o concreto mais endurecido não permite grande movimentação das partículas para baixo, sendo observada apenas a diminuição do índice de vazios do solo, que ao chegar a um pico, passa a iniciar o processo de dilatância da amostra. Com relação aos níveis de concreto, notam-se maiores contrações para os ensaios com $z = -2\text{mm}$, contudo, os valores são próximos e o comportamento é o mesmo.

Figura 129 - Deslocamentos verticais x horizontais



Fonte: O autor.

Por fim, foi possível perceber visualmente as conclusões da análise anterior na superfície de ruptura dos corpos de prova de concreto após o ensaio. As placas de concreto foram fotografadas e são apresentadas na Figura 130 para o ensaio com tempo de cura 0 h e nível 0 mm, na Figura 131 para o com tempo de cura 0 h e nível -2 mm, na Figura 132 para o caso com tempo de cura 15 h e nível 0 mm e na Figura 133 para o com tempo de cura 15 h e nível -2 mm. Na comparação entre a Figura 130 e a Figura 131, e entre a Figura 132 e a Figura 133, nota-se a diferença na altura da camada de areia que cobre a superfície de ruptura, em virtude dos níveis de concreto adotados. Já na relação entre os tempos de cura, ou seja, entre a Figura 130 e a Figura 132 e entre a Figura 131 e a Figura 133, percebe-se uma maior quantidade de areia presente no caso com menor período de cura, evidência de uma possível retração do concreto, que permite a permanência de um maior número de grãos após a ruptura.

Figura 130 - Tempo de cura 0h - Nível do concreto 0mm



Fonte: O autor.

Figura 131 - Tempo de cura 0h - Nível do concreto -2mm



Fonte: O autor.

Figura 132 - Tempo de cura 15h - Nível do concreto 0mm



Fonte: O autor.

Figura 133 - Tempo de cura 15h - Nível do concreto -2mm



Fonte: O autor.

4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM A LITERATURA

Com o objetivo de compreender como os resultados de resistência ao cisalhamento da interface entre areia e o concreto curado sob tensão se relacionam com os dados disponíveis de interfaces areia-concreto na literatura, foram comparados os valores de razão entre ângulos de atrito de pós-pico de 9 autores com os determinados através do método fatorial cruzado do presente trabalho, identificados como Meier (2021). Os dados da literatura utilizados foram compilados por Nardelli (2019), com os autores indicados na Tabela 36 e os parâmetros adotados e resultados descritos na Tabela 37.

Tabela 36 - Referências utilizadas para coleta dos dados

Legenda	Referência bibliográfica
1	Potyondy (1961)
2	Brumund e Leonards (1973)
3	Uesugi <i>et al.</i> (1990)
4	DeJong <i>et al.</i> (2000) e Frost <i>et al.</i> (2002)
5	Gómez <i>et al.</i> (2008)
6	Tiwari e Al-Adhath (2014)
7	Di Donna <i>et al.</i> (2015)
8	Samanta <i>et al.</i> (2018a)
9	Nardelli (2019)
10	Meier (2021)

Fonte: Adaptado de Nardelli (2019).

Tabela 37 - Característica dos ensaios e razões entre ângulos de atrito

Referência	Classificação	Morfologia das partículas	D50 (mm)	DR (%)	Saturação	Rugosidade	δ/ϕ	
1	SW	-	0,58	66	Seca	Lisa	0,89	
						Rugosa	0,98	
					Saturada	Lisa	0,90	
2	SP	Arredondada	0,72	90	Seca	Lisa	0,71	
						Rugosa	0,95	
					Seca	Lisa	0,90	
3	SW	Subarredondada	0,18	95	Seca	Mediana	0,80	
						Rugosa	0,87	
					Seca	Rugosa	0,95	
3	SW	Angular	0,19	90	Seca	Rugosa	0,96	
						Rugosa	1,00	
						Rugosa	1,00	
4	SW	Subarredondada	0,72	80	Seca	Mediana	0,90	
						Rugosa	1,00	
					Seca	Rugosa	1,00	
5	SP	Subarredondada	0,51	80	Seca	Lisa	0,66	
						Mediana	0,84	
						Rugosa	1,00	
6	SW	Angular	0,85	90	Seca	Mediana	0,84	
						Rugosa	1,00	
					Seca	Rugosa	1,00	
7	SP	-	0,50	> 66	Seca	Rugosa	0,95	
						Rugosa	0,88	
						Rugosa	0,88	
8	SW	Angular	0,85	80	Seca	Lisa	0,82	
						Saturada	Lisa	0,88
						Lisa	0,62	
9	SW	Angular	0,85	80	Seca	Lisa	0,62	
						Saturada	Lisa	0,68
						Lisa	0,68	
10	SW	Angular	0,85	80	Seca	Lisa	0,74	
						Saturada	Lisa	0,72
						Lisa	0,72	
11	SW	Angular	0,85	80	Seca	Lisa	0,71	
						Saturada	Lisa	0,69
						Lisa	0,69	
12	SP	Subarredondada	0,55	10	Saturada	Lisa	0,94	
						Lisa	0,94	
						Lisa	0,94	
13	SM	-	0,60	10	Saturada	Lisa	0,91	
						Lisa	0,91	
						Lisa	0,91	
14	SP/SM	-	0,52	10	Saturada	Lisa	0,97	
						Lisa	0,97	
						Lisa	0,97	
15	SP	-	0,50	> 66	Seca	Lisa	0,77	
						Mediana	0,80	
						Rugosa	0,87	

Tabela 37 - Característica dos ensaios e razões entre ângulos de atrito (continuação)

Referência	Classificação	Morfologia das partículas	D50 (mm)	DR (%)	Saturação	Rugosidade	δ/ϕ	
8	SP	Subarredondada	1,20	80	Seca	Mediana	0,82	
				50	Seca	Mediana	0,92	
	SP	Subarredondada	0,23	80	Seca	Rugosa	0,86	
				50	Seca	Rugosa	0,86	
9	SP	Subangular	0,24	70	Seca	Lisa	0,81	
					Seca	Rugosa	0,89	
	SP	Subangular	1,73	70	Seca	Lisa	0,92	
					Seca	Rugosa	0,96	
					30	Seca	Lisa	0,89
					30	Seca	Rugosa	0,93
10	SP	Subangular	0,60	70	Parcial. Sat.	Rugosa	1,02	
							0,96	
	SP	Subangular	1,10	70	Parcial. Sat.	Rugosa	1,02	
							0,96	
							1,04	
							1,05	
							1,08	
							1,08	
							1,01	
							0,97	
0,96								
0,93								
0,98								
1,03								
0,97								
1,07								

Fonte: Adaptado de Nardelli (2019).

Os autores realizaram os ensaios no equipamento de cisalhamento direto, com exceção de Uesugi et al. (1990), que executou cisalhamento simples, e Brumunds e Leonards (1973), que utilizaram um equipamento especial. Os parâmetros compilados por Nardelli (2019) foram: a classificação unificada dos solos (SUCS), a morfologia das partículas, o diâmetro médio dos grãos (D50), a densidade relativa (DR), a condição de saturação do ensaio e a rugosidade. Ressalva-se, todavia, que as informações referentes à rugosidade foram coletadas de forma qualitativa e quantitativa, devido à falta de padronização entre os autores. Portanto, para a avaliação qualitativa, Nardelli (2019) utilizou como fator a superfície sobre a qual foi moldado o concreto, sendo lisa para metal, vidro, plástico ou madeira e rugosa em superfícies ásperas ou

solo. Quantitativamente, classificou-se a superfície de acordo com Paikowsky *et al.* (1995), através da relação entre a rugosidade e o diâmetro médio dos grãos, sendo lisa para o caso de a rugosidade ser inferior a 5% do D50, rugosa quando for superior a 10% do D50 e mediana na condição intermediária.

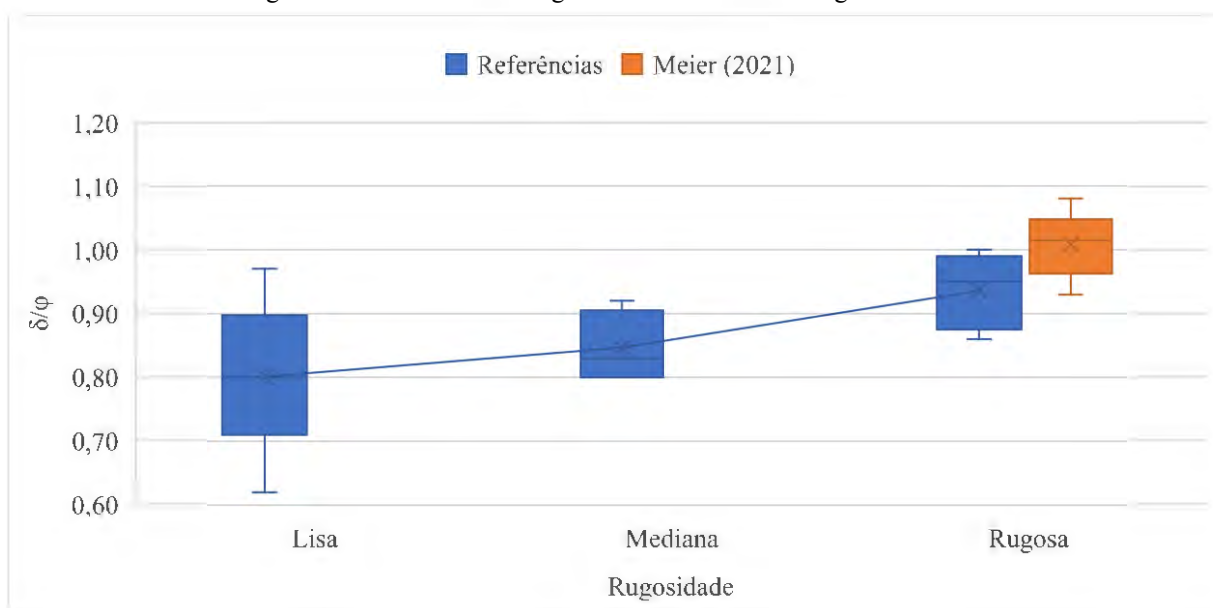
Os ensaios deste presente trabalho, todavia, foram realizados em concreto curado sob tensão, tendo ainda como variáveis a umidade e o tempo de cura. Contudo, esses fatores não tiveram influência sobre a variação da razão entre ângulos de atrito de pós-pico, conforme foi constatado no item 4.1.2.2 (Figura 70 e Figura 72). Ainda, como os ensaios deste estudo foram realizados com solo úmido, eles se encaixam no caso parcialmente saturado, para o qual não há outros ensaios disponíveis para comparação. Portanto, para cada nível dessa etapa foram agrupados os quatro valores de resposta advindos das variações de umidade e dos tempos de cura, possibilitando uma indicação da dispersão dos resultados.

A primeira comparação realizada foi referente à rugosidade (Figura 134). Os ensaios do presente trabalho foram feitos apenas em superfícies rugosas, cuja comparação com as referências apresenta uma boa concordância. Contudo, as razões entre ângulos de atrito foram superiores para o caso do concreto curado sob tensão, com média de 1,01. Ainda, os valores da literatura possuem um crescimento da razão entre ângulos de atrito com o aumento da rugosidade, com seus valores médios indo de 0,80 para o caso liso a 0,94 para o rugoso. Com base nesse comportamento, nas próximas análises se teve o cuidado de identificar a rugosidade dos pontos, evitando-se interpretações errôneas sobre a influência dos outros fatores. Por fim, nota-se que a dispersão dos resultados da literatura é superior para o caso de superfícies lisas.

A análise seguinte foi referente ao diâmetro médio dos grãos, apresentada na Figura 135. Nesse caso se optou por um gráfico de dispersão, devido à disponibilidade dos valores discretos de cada estudo. Primeiramente, nota-se que novamente os valores de razão entre ângulos de atrito foram maiores para o presente estudo, principalmente para a areia média (D50 0,60 mm). Ainda, que sua distribuição de pontos se localiza na porção superior dos resultados, próximos aos outros ensaios em superfícies rugosas. Com relação aos valores da literatura, percebe-se mais uma vez a maior dispersão nos ensaios em superfície lisa.

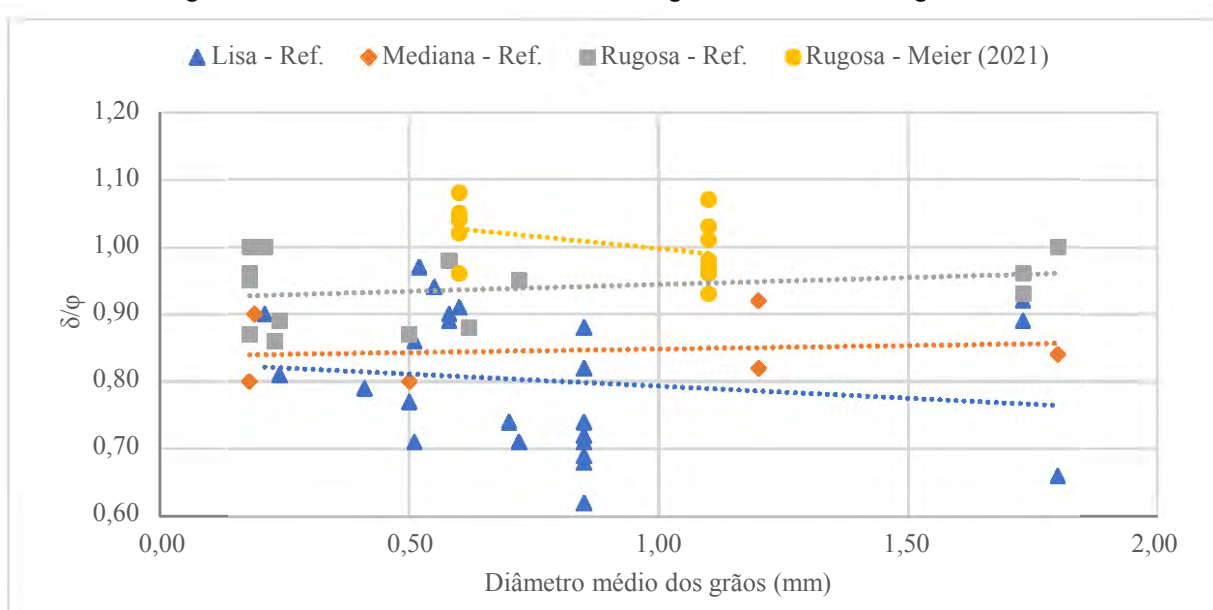
Na comparação entre a razão entre ângulos de atrito e a densidade relativa (Figura 136), manteve-se a superioridade dos valores do presente estudo, que assumiram valores maiores para a densidade relativa de 70%. Contudo, esses valores estão próximos aos ensaios em superfície rugosa da literatura. Ainda, a dispersão dos resultados assume um comportamento semelhante ao observado para análise da influência do diâmetro médio dos grãos.

Figura 134 - Influência da rugosidade na razão entre ângulos de atrito



Fonte: O autor.

Figura 135 - Influência do diâmetro médio dos grãos na razão entre ângulos de atrito

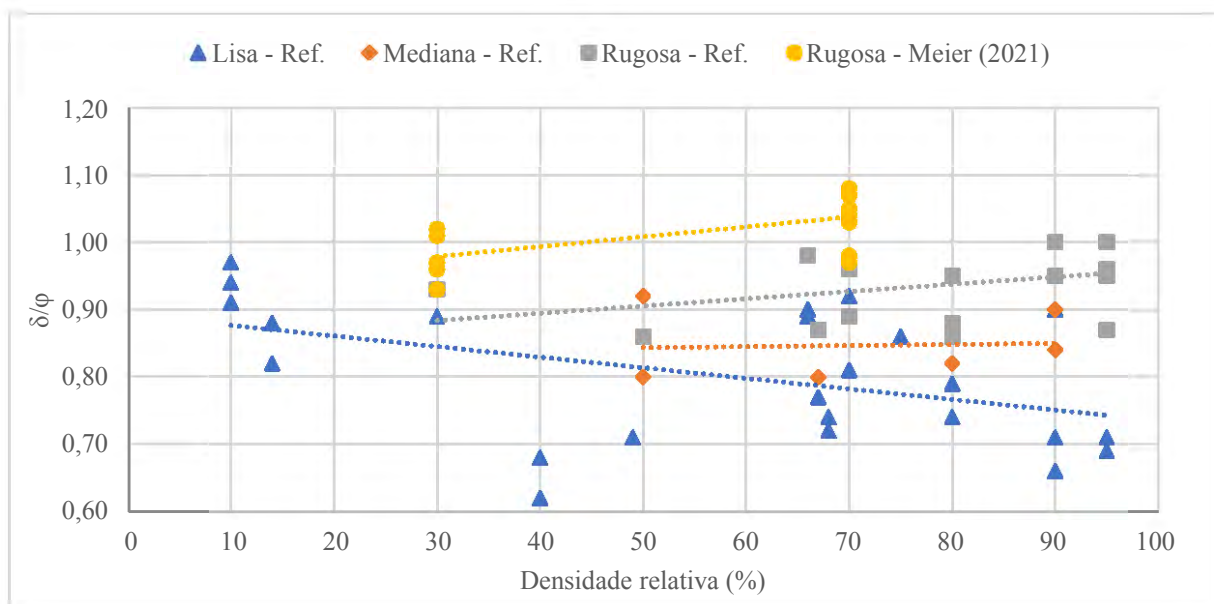


Fonte: O autor.

Na quarta análise foi avaliada a morfologia das partículas (Figura 137), agrupada em duas categorias, grãos subarredondados a arredondados e subangulares a angulares. Conforme visto anteriormente, os valores do presente estudo foram superiores, mas com grande proximidade aos ensaios em superfícies rugosas e grãos mais angulosos da literatura. Com relação aos ensaios dos outros autores, nota-se de maneira geral que os valores de razão entre ângulos de atrito são superiores para os grãos mais angulares que os arredondados, devido ao

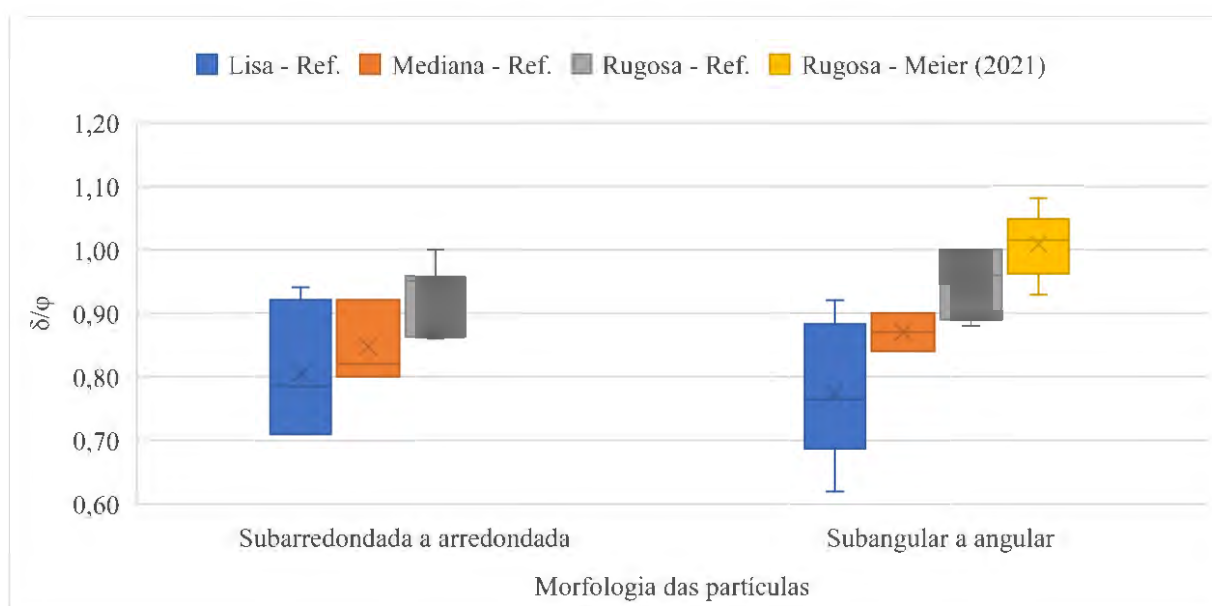
maior intertravamento entre as partículas. Todavia, esse comportamento não foi visto para os ensaios de rugosidade lisa, provavelmente em virtude da maior dispersão desses resultados.

Figura 136 - Influência da densidade relativa na razão entre ângulos de atrito



Fonte: O autor.

Figura 137 - Influência da morfologia das partículas na razão entre ângulos de atrito

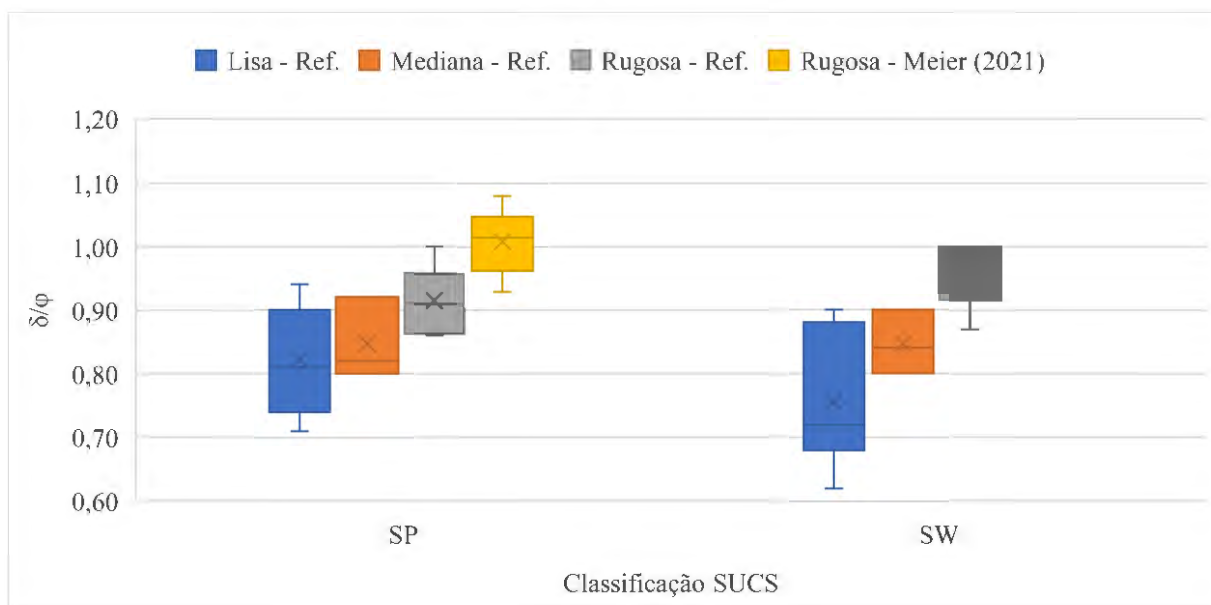


Fonte: O autor.

Para finalizar as comparações foi analisado o efeito da distribuição granulométrica para as areias mal graduadas (SP) e bem graduadas (SW), apresentado na Figura 138. Nesse caso o presente estudo se afastou da média dos ensaios de rugosidade elevada em areias mal graduadas, indicando que a influência dos outros fatores não discriminados nessa análise, como o diâmetro

médio dos grãos e a morfologia das partículas, afeta de maneira conjunta nos resultados. Essa explicação também se reflete na análise dos ensaios da literatura, para a qual as areias mal graduadas apresentaram uma razão entre ângulos de atrito média superior a bem graduada para superfícies lisas, um resultado não esperado, em virtude do maior intertravamento das partículas das areias com maior distribuição de tamanhos de grãos.

Figura 138 - Influência da distribuição granulométrica na razão entre ângulos de atrito



Fonte: O autor.

Por fim, conclui-se que os resultados do presente estudo obtiveram os maiores valores de razão entre ângulos de atrito em todos os parâmetros avaliados, contudo, mantiveram-se coerentes com o comportamento observado para os ensaios em interface areia-concreto da literatura. Infere-se, portanto, que a causa dessa discrepância possa ter origem nos dois fatores analisados neste trabalho que não são contemplados nos resultados disponibilizados por outros autores: a umidade e o tempo de cura.

Com relação a umidade e o tempo de cura, conforme visto no item 4.1.2.2, as razões entre ângulos de atrito de pós-pico não variavam nos ensaios para os níveis adotados desses dois parâmetros. Todavia, não se pode afirmar que não há variação em relação aos ensaios com saturação nula e aos com corpos de prova de concreto já endurecidos externamente ao conjunto de cisalhamento direto, como os casos dos estudos disponíveis na literatura. Portanto, são necessárias mais pesquisas em concreto curado sob tensão para melhor avaliação da umidade da amostra e do tempo de cura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho experimental e as análises estatísticas realizadas ao longo desta pesquisa permitiram delinear diversas considerações acerca da resistência ao cisalhamento das interfaces entre areia e concreto.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As amostras de areia deste estudo foram provenientes da dragagem e beneficiamento da areia do Rio Cubatão (Joinville/SC), com geologia predominante pertencente às coberturas sedimentares do Cenozóico. A partir do ensaio de granulometria se obteve a classificação de ambas amostras como areia mal graduada, sendo o diâmetro médio dos grãos da areia média de 0,60 mm e o da grossa de 1,10 mm, suprindo os critérios de tamanho superior à areia de Araquari e proximidade de uma das amostras com a areia normal brasileira (IPT). Através da micrografia, ambas as amostras tiveram a morfologia dos grãos definida como subangular.

Os materiais que compõem as placas de concreto curado sob tensão utilizadas como interface foram os mesmos das estacas do Campo Experimental de Araquari, por meio da areia com D50 0,72 mm, da brita com D50 6,20 mm e grãos com dimensões inferiores a 10 mm, do cimento CP-IV Votoran RS e do aditivo superplastificante MC Powerflow 1180. O valor de resistência à compressão aos 28 dias foi de 35,87 MPa, atendendo ao critério definido de f_{ck} de 20 MPa.

5.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Os ensaios de cisalhamento direto foram utilizados para determinar a resistência ao cisalhamento das areias e da interface areia-concreto curado sob tensão. De uma análise geral dos resultados foram verificadas diferenças nas densidades reais obtidas de até 20%, provavelmente em virtude da perda de material durante a moldagem, e entre 1 e 2% para a umidade, em razão da secagem do material. Foi também observada um acréscimo de umidade durante os ensaios em interface, devido à passagem de água do concreto fresco para a areia.

Com relação à análise dos gráficos gerados através dos ensaios, notou-se algumas discrepâncias nos valores de deslocamento vertical, provavelmente originadas por erros na montagem, contudo, sem grande influência na resposta. Ainda, observou-se de forma geral um comportamento coerente com a literatura para as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal, com compactação e *hardening*

para areia fofas e dilatância e *softening* para areias densas. Todavia, foram observados alguns *outliers* na posição dos valores das tensões cisalhantes de pico e pós-pico, provavelmente devido às diferenças observadas para as densidades relativas reais.

Para a análise dos resultados das tensões cisalhantes, os ensaios de cisalhamento direto foram divididos em dois grupos: fatorial cruzado e metodologia de superfície de resposta. O primeiro objetivo da etapa fatorial cruzado foi determinar a influência dos fatores controláveis no coeficiente de atrito para os casos de pico e pós-pico. Para a densidade relativa foi observada uma relação crescente para as situações de pico de interface e areia, mas constante no caso de pós-pico da interface e decrescente para o pós-pico de areia, sendo a única discrepância com a literatura sendo observada para o último caso. Também foi analisado o comportamento geral do coeficiente de atrito em relação à umidade, que se apresentou decrescente com o acréscimo de umidade, exceto no caso de pico para areia, que contraria os resultados esperados. Com relação à influência do tempo de cura, percebe-se um leve aumento no coeficiente de atrito de pico, enquanto que para a de pós-pico ocorre um decréscimo, contudo, para ambos os casos a diferença numérica é pequena. Acerca do efeito da tensão normal, nota-se um comportamento decrescente do coeficiente para os ensaios de interface e crescente para os de areia, indicando a necessidade de uma parcela de adesão na regressão linear das tensões cisalhantes da interface. Por fim, o comportamento geral do coeficiente de atrito é o seu crescimento com o aumento do tamanho dos grãos, mas com baixíssima influência para a tensão cisalhante de pós-pico da interface. O comportamento observado foi o oposto da literatura para interfaces entre areia e aço, provavelmente em virtude da rugosidade impressa na superfície durante a cura do concreto, o que explicaria a maior resistência na interface.

Outro objetivo dos ensaios fatorial cruzado foi a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Os valores médios de adesão na interface no pico (τ_p), ângulo de atrito da interface de pico (δ_p), ângulo de atrito da interface de pós-pico (δ_{pp}), ângulo de atrito da areia de pico (ϕ_p) e ângulo de atrito da areia de pós-pico (ϕ_{pp}) foram, respectivamente, de 6,9 kPa, 32,9°, 32,9°, 34,6° e 32,1° para a areia média (D50 0,60 mm) e de 7,4 kPa, 34,0°, 33,0°, 36,2° e 33,4° para a areia grossa (D50 1,10 mm). Ainda, foram calculadas as razões entre os ângulos de atrito da interface e da areia, cuja média da areia com D50 0,60 mm foi de 0,95 para o caso de pico e 1,03 para o de pós-pico, próximos aos de 0,94 e 0,99, respectivamente, para a areia com D50 1,10 mm.

Através da metodologia de superfície resposta (RSM) foram obtidos modelos de segunda ordem para as tensões cisalhantes de pico e pós-pico da interface e da areia pura para

as duas amostras. Os valores de R^2 foram superiores a 0,97, sendo os modelos significativos para todas as situações. Todavia, alguns casos apresentaram uma falta de ajuste mais significativa, provavelmente em virtude da menor dispersão dos resultados, em comparação com as variações experimentais, utilizados para a determinação do erro puro. Na validação com os resultados experimentais foram observadas diferenças entre os valores de tensão cisalhante de 0,01 a 7,80 kPa, sendo mais relevantes no modelo de pós-pico da areia grossa.

A partir dos modelos foram determinados os parâmetros de resistência, seguindo a mesma abordagem do método fatorial cruzado. Os valores médios de adesão na interface no pico (δ_{ap}), ângulo de atrito da interface de pico (δ_p), ângulo de atrito da interface de pós-pico (δ_{pp}), ângulo de atrito da areia de pico (ϕ_p) e ângulo de atrito da areia de pós-pico (ϕ_{pp}) foram, respectivamente, de 7,7 kPa, 32,4°, 32,6°, 35,5° e 33,0° para a areia média (D50 0,60 mm) e de 7,5 kPa, 33,5°, 33,0°, 36,1° e 33,2° para a areia grossa (D50 1,10 mm). Ainda, foram calculadas as razões entre os ângulos de atrito da interface e da areia, cuja média da areia com D50 0,60 mm foi de 0,91 para o caso de pico e 0,99 para o de pós-pico, próximos aos de 0,93 e 0,99, respectivamente, para a areia com D50 1,10 mm.

Por meio da comparação entre os parâmetros obtidos através dos modelos de segunda ordem e dos advindos da regressão linear dos resultados experimentais, nota-se a semelhança entre os valores de adesão, com diferença entre médias inferior a 1 kPa, e dos ângulos de atrito, com variação entre médias de no máximo 1°. Entretanto, a RSM apresentou discrepâncias nas análises das variáveis densidade relativa e umidade, que pode estar relacionada à variação experimental dos níveis fixos, que não foi considerada nos modelos matemáticos.

5.3 RUGOSIDADE

Os ensaios de rugosidade foram realizados em escala reduzida e proporcionaram a avaliação dos efeitos dos fatores controláveis, com exceção do tempo de cura, nas respostas de rugosidade média (R_a), rugosidade máxima (R_{max}), rugosidade máxima média (R^*_{max}) e rugosidades normalizadas (R_n e R^*_n). Percebeu-se a influência do diâmetro médio dos grãos como único fator relevante para a rugosidade, sendo a relação entre o valor de rugosidade e o tamanho dos grãos crescente para R_a , R_{max} e R^*_{max} , mas decrescente para R_n e R^*_n .

Por fim, foram obtidos os valores médios de R_n e R^*_n , respectivamente, de 1,149 e 0,371 para a areia média e de 0,801 e 0,331 para a grossa. Os valores de R_n foram comparados com a classificação de Paikowsky *et al.* (1995), sendo ambas superfícies consideradas como rugosas.

5.4 SUPERFÍCIE DE CISALHAMENTO

Também se buscou avaliar nesta pesquisa o comportamento da provável superfície de cisalhamento através da comparação entre as medições de deslocamento vertical da interface e da areia pura e da realização de ensaios de cisalhamento direto em interface para dois tempos de cura e níveis de concreto.

Nas medições de deslocamentos verticais foi notada uma grande dispersão dos valores máximos entre as tensões normais aplicadas. Contudo, foi possível estabelecer uma regressão logarítmica e percebida uma diferença entre as curvas dos ensaios de interface e de areia pura. Concluiu-se que essa diferença corresponde ao deslocamento vertical do nível de concreto, cujo valor médio para as duas amostras foi de 0,30 mm para uma tensão normal de 100 kPa.

Os ensaios de cisalhamento direto foram utilizados para determinar se havia alguma mudança entre os valores obtidos para uma interface definida como areia-areia (com nível de concreto rebaixado em 2 mm) e uma no nível da caixa do equipamento. A partir dos resultados, todavia, não foi possível perceber uma diferença significativa entre os valores, indicando a mesma superfície de cisalhamento. Ressalva-se, contudo, que a areia que está sofrendo a ruptura é influenciada pelo concreto curado sob tensão que penetra na amostra durante a etapa de estabilização de deslocamentos verticais, podendo ocasionar valores diferentes dos ensaios em areia pura. Por fim, foram observadas diferenças no comportamento das curvas devido ao tempo de cura, indicando uma maior rigidez para tempos superiores, provavelmente em virtude da adesão entre o concreto e a areia.

5.5 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Com o objetivo de compreender como os resultados de resistência ao cisalhamento da interface areia-concreto curado sob tensão se relacionam com os dados disponíveis na literatura, foram comparados os valores de razão entre ângulos de atrito de pós-pico de 9 autores, compilados por Nardelli (2019), com os determinados experimentalmente na presente pesquisa. Os fatores controláveis utilizados para comparação foram a rugosidade, o diâmetro médio dos grãos, a densidade relativa, a morfologia das partículas e a classificação SUCS.

Concluiu-se que os resultados do presente estudo obtiveram valores maiores que outros autores em todos os parâmetros avaliados, contudo, mantiveram-se coerentes com o comportamento observado. Infere-se, portanto, que a causa dessa discrepância tenha nos dois fatores analisados neste trabalho que não foram contemplados nos resultados disponibilizados

por outros autores: a umidade e o tempo de cura. Portanto, são necessárias mais pesquisas em interfaces de concreto curado sob tensão para melhor avaliação da umidade da amostra e do tempo de cura.

5.6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo geral explicar mecanismo do comportamento da resistência ao cisalhamento na interface de estacas escavadas de concreto, moldadas em solos arenosos. Para simular as estacas moldadas *in loco* foram realizados ensaios de cisalhamento direto em interfaces de areia-concreto curado sob tensão, a partir dos quais se destaca que os valores de ângulo de atrito na interface foram muito próximos, ou superiores, aos ângulos de atrito da areia. Isso se deve ao fato de a ruptura estudada ter ocorrido numa superfície areia-areia, conforme esquematizado por Samanta *et al.* (2018a) na Figura 18, na qual rugosidade elevada permite um grande intertravamento dos grãos e o preenchimento dos vales da superfície, cujo comportamento foi observado nas fotografias do item 4.4. Ainda, foram observadas diferentes rigidezes nas curvas da Figura 128, provavelmente em virtude da adesão entre o concreto e a areia, mas que é vencida com o avanço dos deslocamentos.

Para uma estaca real, todavia, a ruptura não possui uma superfície imposta como no ensaio de cisalhamento direto, podendo ocorrer no solo adjacente à estaca caso sua resistência seja inferior à da interface areia-concreto curado sob tensão. Portanto, é coerente utilizar no dimensionamento o valor do ângulo de atrito na interface como menor ou igual ao ângulo de atrito do solo.

5.7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade do presente estudo se tem como proposta a realização de ensaios de cisalhamento em concreto curado sob tensão para outras areias, com diâmetro médio dos grãos e morfologia distintos. Outro ponto aspecto a ser pesquisado é a relação dos ângulos de atrito na posição de pós-pico com o ângulo de atrito do estado crítico, para melhor caracterização do material. Por fim, sugere-se uma análise comparativa entre a rugosidade da superfície do concreto curado sob tensão antes e depois do cisalhamento, para diferentes tempos de cura.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12004**. Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12051**. Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms**. Washington, D.C.: API RP, 2002.
- ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEER. **B46.1**. Surface texture: surface roughness, waviness, and lay. New York, 2009.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Philadelphia, 2011.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2488**: Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedures). Philadelphia, 2017.
- BOLTON, M. D. The strength and dilatancy of sands. **Géotechnique**, v. 36, n. 1, p. 65-78, 1986. DOI: 10.1680/geot.1986.36.1.65
- BORGES, A. B. **Análise dos efeitos das tensões residuais em estacas escavadas: abordagem computacional**. 2019. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S. Multifactor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 28, p. 195–242, 1957.

BRUMUND, W. F.; LEONARDS, G. A. Experimental study of static and dynamic friction between soil and typical construction materials. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 1, n. 2, p. 162-165, 1973.

BURLAND, J. B. Shaft friction of piles in clay- a simple fundamental approach. **Ground Engineering**, v.6, n. 3, p. 30, maio 1973.

CAVALCANTE, E. H. Campos experimentais brasileiros. In: **XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – XIII COBRAMSEG**. Curitiba, 2006.

CHODUR, N. **Mineralogia e geologia dos depósitos de rubi e safira da região de barra velha, Santa Catarina**. 2016. 210 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

CHRUSCIAK, M. R. **Transferência de carga na interface solo-concreto de estacas em solo arenoso**. 2021. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021 (A ser publicado).

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina**. Escala: 1:500.000, 2014.

DEJONG, J. T.; FROST, J. D. A multisleeve friction attachment for the cone penetrometer. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, n. 2, p. 111-127, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ11355J>

DEJONG, J. T.; FROST, J. D.; SACS, M. Relating quantitative measures of surface roughness and hardness to geomaterial interface strength. **Proceedings of GeoEngineering**. Sydney, 6 p., 2000.

DEJONG, J. T.; RANDOLPH, M. F.; WHITE, D. J. Interface Load Transfer Degradation During Cyclic Loading: A Microscale Investigation. **Soils and Foundations**, v. 43, n. 4, p. 81–93, 2003. DOI: 10.3208/sandf.43.4_81

DEJONG, J. T.; WESTGATE, Z. J. Role of initial state, material properties, and confinement condition on local and global soil-structure interface behaviour. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 11, p. 1646-1660, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:11(1646)

DI DONA, A.; FERRARI, A.; LALOUI, L. Experimental investigations of the soil–concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53, n. 4, p. 659-672, 2015. DOI: 10.1139/cgj-2015-0294

DIETZ, M. S.; LINGS, M. L. Postpeak strength of interfaces in a stress-dilatancy framework. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 11, p. 1474-1484, 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1474)

DOVE, J. E.; FROST, J. D. Peak friction behavior of smooth geomembrane-particle interfaces. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, n. 7, p. 544-555, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:7\(544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:7(544))

FAKHARIAN, K.; EVGIN, E. An automated apparatus for three-dimensional monotonic and cyclic testing of interfaces. **Geotechnical Testing Journal**, v. 19, n. 1, p. 22-31, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ11404J>

FELLENIUS, B. H. Effective stress analysis and set-up for shaft capacity of piles in clay. Honoring John Schmertmann - From Research to practice in Geotechnical Engineering. In: LAIER, J. E.; CRAPPS, D. K.; HUSSEIN, M. H. (Eds.). **ASCE Geotechnical Special Publication**, GSP180, p. 384-406, 2008.

FELLENIUS, B. H. **Basics of foundation design**. Eletronic Edition. Vero Beach, FL: Pile Buck International, Inc., 2020. Disponível em: <www.fellenius.net>. Acesso em: 26 jun. 2020.

FELLENIUS, B. H.; ALTAEE, A. A. The critical depth - How it came into being and why it does not exist. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering Journal**, v. 113, n. 2, p. 107-111, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1680/igeng.1995.27590>

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-morfológica. In: GUERRA, A. T., CUNHA, S. B. da. **Geomorfologia e meio ambiente**. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

FLEMING, W. G. K.; WELTMAN, A. J.; RANDOLPH, M. F.; ELSON, W. K. **Piling Engineering**. Guildford: Surrey University Press, 1992.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 15, n. 3, p. 313-321, 1978. DOI: 10.1139/t78-029

FROST, J. D.; DEJONG, J. T.; RECALDE, M. Shear failure behavior of granular-continuum interfaces. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 69, p. 2029-2048, 2002. DOI: 10.1016/S0013-7944(02)00075-9

GAITONDE, V. N.; MANJIAH, M.; MARADI, S.; KARNIK, S. R.; PETKAR, P. M.; DAVIM J. P. Multiresponse optimization in wire electric discharge machining (WEDM) of HCHCr steel by integrating response surface methodology (RSM) with differential evolution (DE). In: DAVIM, J. P. (Eds.). **Computational Methods and Production Engineering: Research and Development**. Elsevier Science, 2017. cap. 7, p.199-221.

GÓMEZ, J. E.; FILZ, G. M.; EBELING, R. M.; DOVE, J. E. Sand-to-concrete interface response to complex load paths in a large displacement shear box. **Geotechnical Testing Journal**, v. 31, n. 4, p. 358-369, 2008.

HAMID, T. B.; MILLER, G. A. Shear strength of unsaturated soil interfaces. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 46, n. 5, p. 595-606, 2009. DOI: 10.1139/T09-002.

HAN, F.; GANJU, E.; SALGADO, R.; PREZZI, M. Effects of Interface Roughness, Particle Geometry, and Gradation on the Sand–Steel Interface Friction Angle. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144, n. 12, p. 1-12, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001990](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001990)

HOLT, E. E. **Early age autogenous shrinkage of concrete**. 2001. 184 f. Monografia (Doutorado) - VTT Technical Research Centre of Finland, University of Washington, Espoo, 2001.

HORN FILHO, N. O. et al. Estudo Geológico dos Depósitos Clásticos Quaternários Superficiais da Planície Costeira de Santa Catarina, Brasil. **Gravel**, v. 12, n. 1, p. 41-107, 2014.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**: Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JARDINE, R. J.; CHOW, F. C. **New design methods for offshore piles**, MTD Publication 96/103. Londres: Marine Technology Directorate, 1996.

JARDINE, R. J.; LEHANE, B. M.; EVERTON, S. J. Friction Coefficients for Piles in Sands and Silts. **Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour**, v.23, p. 661-677, 1993.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen- Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130

KRAFT, L. M. Computing axial pile capacity in sands for offshore conditions. **Marine Geotechnology**, v. 9, n. 1, p. 61–92, 1990.

KULHAWY, F. H. Drilled Shaft Foundations. In: **Foundation Engineering Handbook SE - 14**. Boston: Springer US, 1991. p. 537–552.

LAVALLE, L. V. A. **Estudo da interação solo-concreto das estacas escavadas do campo experimental de Araquari**. 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

LEHANE, B. M.; JARDINE, R. J.; BOND, A. J.; FRANK, R. Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 199, n. 1, p. 19-35, 1993.

MEIER, A. L.; FARO, V. P.; BARBOSA, L. D. Caracterização de Areias do Norte Catarinense. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Campinas, 8 p., 2022 (Aceito para publicação).

MILLER, G. A.; HAMID, T. B. Interface direct shear testing of unsaturated soil. **Geotechnical Testing Journal**, v. 30, n. 3, p. 1-10, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. New York: Wiley, 2013.

MYERS R. H.; MONTGOMERY, D.C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology**: Process and product optimization using designed experiments. 4. ed. New York: Wiley, 216.

NARDELLI, A. **The shaft friction degradation of piles under cyclic axial loading in wind turbine foundations**. 2019. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2019.

NIENOV, F. A. **Desempenho de estacas escavadas de grande diâmetro em solo arenoso sob carregamento vertical**. 2016. 267 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

OLIVEIRA, B. Boxplot: como interpretar? **Oper**, 2019. Disponível em: <<https://operdata.com.br/blog/como-interpretar-um-boxplot/>>. Acesso em: 26 jan. 2021.

PAIKOWSKY, S. G. **A Static Evaluation of Soil Plug Behavior with Application to the Pile Plugging Problem**. 1989. 523 f. Doctor of Science (PhD) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1989.

PAIKOWSKY, S. G.; PLAYER, C. M.; CONNORS, P. J. A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid surfaces. **Geotechnical Testing Journal**, v. 18, n. 2, p. 168-193, 1995.

PENNINGTON, D. S. Cracked? Exploring post construction evidence in the interpretation of trial pile data. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, v. 113, n. 3, p. 132–143, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1680/igeng.1995.27809>

POTYONDY, J. G. Skin friction between various soils and construction materials. **Geotechnique Journal**, v. 11, n. 4, p. 339–355, 1961. DOI: 10.1680/geot.1961.11.4.339

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Pile Foundation Analysis and Design**. New York: John Wiley, 1980.

RANDOLPH, M. D. J. Design of driven piles in sand. **Géotechnique**, v. 44, n. 3, p. 427–448, 1994

REDDY, E. S.; CHAPMAN, D. N.; SASTRY, V. V. R. N. Direct shear interface test for shaft capacity of piles in sand. **Geotechnical Testing Journal**, v. 23, n. 2, p. 199-205, 2000.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2003, 125p.

SADHUKHAN, B.; MONDAL, N. K.; CHATTORAJ, S. Optimisation using central composite design (CCD) and the desirability function for sorption of methylene blue from aqueous solution onto Lemna major. **Karbala International Journal of Modern Science**, v. 2, n. 3, 2016, p. 145-155, 2016. DOI: 10.1016/j.kijoms.2016.03.005

SALGADO, R. **The engineering of foundations**. McGraw-Hill, 2008.

SAMANTA, M.; PUNETHA, P.; SHARMA, M. Effect of roughness on interface shear behavior of sand with steel and concrete surface. **Geomechanics and Engineering**, v. 14, n. 4, p. 387–398. DOI: <https://doi.org/10.12989/GAE.2018.14.4.387>

SESTREM, L. P. **Mecanismos de transferência de carga em estacas escavadas em solos arenosos através de provas de carga instrumentadas**. 2018. 271 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SUGUIO, K.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C.; DOMINGUES, J. M.; FLEXOR, J. M.; AZEVEDO, A. E. G. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 15, n. 4, p. 273-287, 1985.

SUGUIO, K.; MARTIN, L.; FLEXOR, J. M.; AZEVEDO, A. D. The Quaternary sedimentary deposits in the States of Paraná and Santa Catarina coastal plains. **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**, v. 4, p. 3-25, 1986.

TABUCANON, J. T.; AIREY, D. W.; POULOS, H. G. Pile skin friction in sands from constant normal stiffness tests. **Geotechnical Testing Journal**, v. 18, n. 3, p. 350-364, 1995.

TEHRANI, F. S.; HAN, F.; SALGADO, R.; PREZZI, M.; TOVAR, R. D.; CASTRO, A. G. Effect of surface roughness on the shaft resistance of non-displacement piles embedded in sand. **Géotechnique**, v. 66, n. 5, p. 386-400, mar. 2016. DOI: [10.1680/jgeot.15.P.007](https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.007)

TIWARI, B.; AL-ADHADH, A. R. Influence of relative density on static soil-structure frictional resistance of dry and saturated sand. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 32, n. 2, p. 411-427, 2014. DOI: [10.1007/s10706-013-9723-6](https://doi.org/10.1007/s10706-013-9723-6)

TOVAR-VALENCIA, R. D.; GALVIS-CASTRO, A.; SALGADO, R.; PREZZI, M. Effect of Surface Roughness on the Shaft Resistance of Displacement Model Piles in Sand, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144, n. 3, p. 1-17, 2018. DOI: [10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001828](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001828)

UESUGI, M.; KISHIDA, H. Influential factors of friction between steel and dry sands. **Soil and Foundations**, v. 26, n. 2, p. 33-46, 1986a.

UESUGI, M.; KISHIDA, H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel. **Soil and Foundations**, v. 26, n. 4, p. 139-149, 1986b. DOI: [10.3208/sandf1972.26.4_139](https://doi.org/10.3208/sandf1972.26.4_139)

UESUGI, M.; KISHIDA, H.; TSUBAKIHARA, Y. Behavior of sand particles in sand-steel friction. **Soils and Foundations**, v. 28, n.1, p. 107–118, 1988. DOI: [10.3208/sandf1972.28.107](https://doi.org/10.3208/sandf1972.28.107)

UESUGI, M.; KISHIDA, H.; UCHIKAWA, Y. Friction between dry sand concrete under monotonic and repeated loading. **Soils and Foundations**. v. 30, n. 1, p. 115-128, 1990. DOI: [10.3208/sandf1972.30.115](https://doi.org/10.3208/sandf1972.30.115)

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E.; CLIFTON, A.W. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, p. 379–392, 1996. DOI: 10.1139/t96-060.

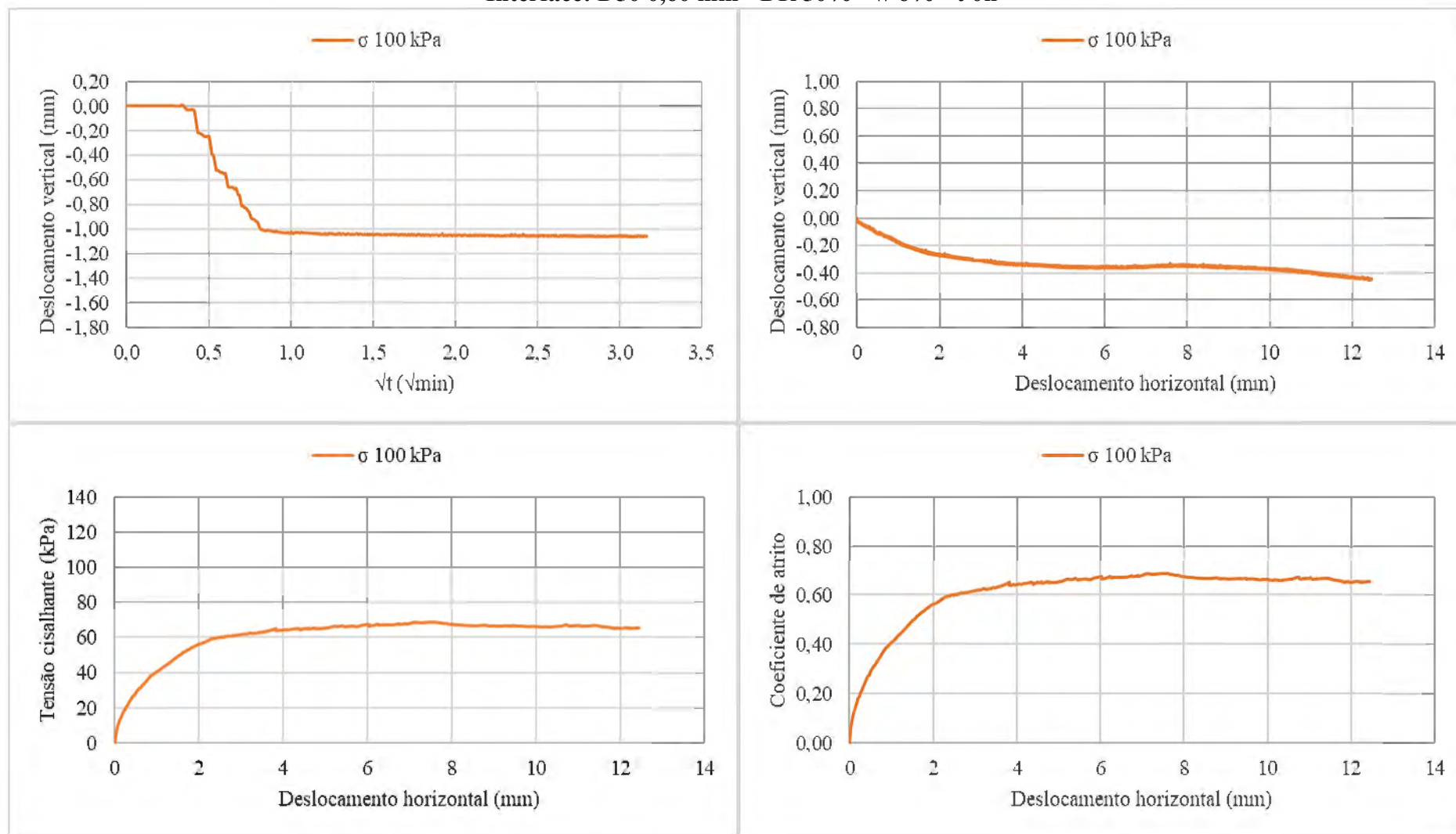
VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**. Volume completo. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

VESIC, A. S. Ultimate loads and settlements of deep foundations in sand. In: **Bearing Capacity and Settlement of Foundations**, Symposium held at Duke University Durham, North Carolina, 1965

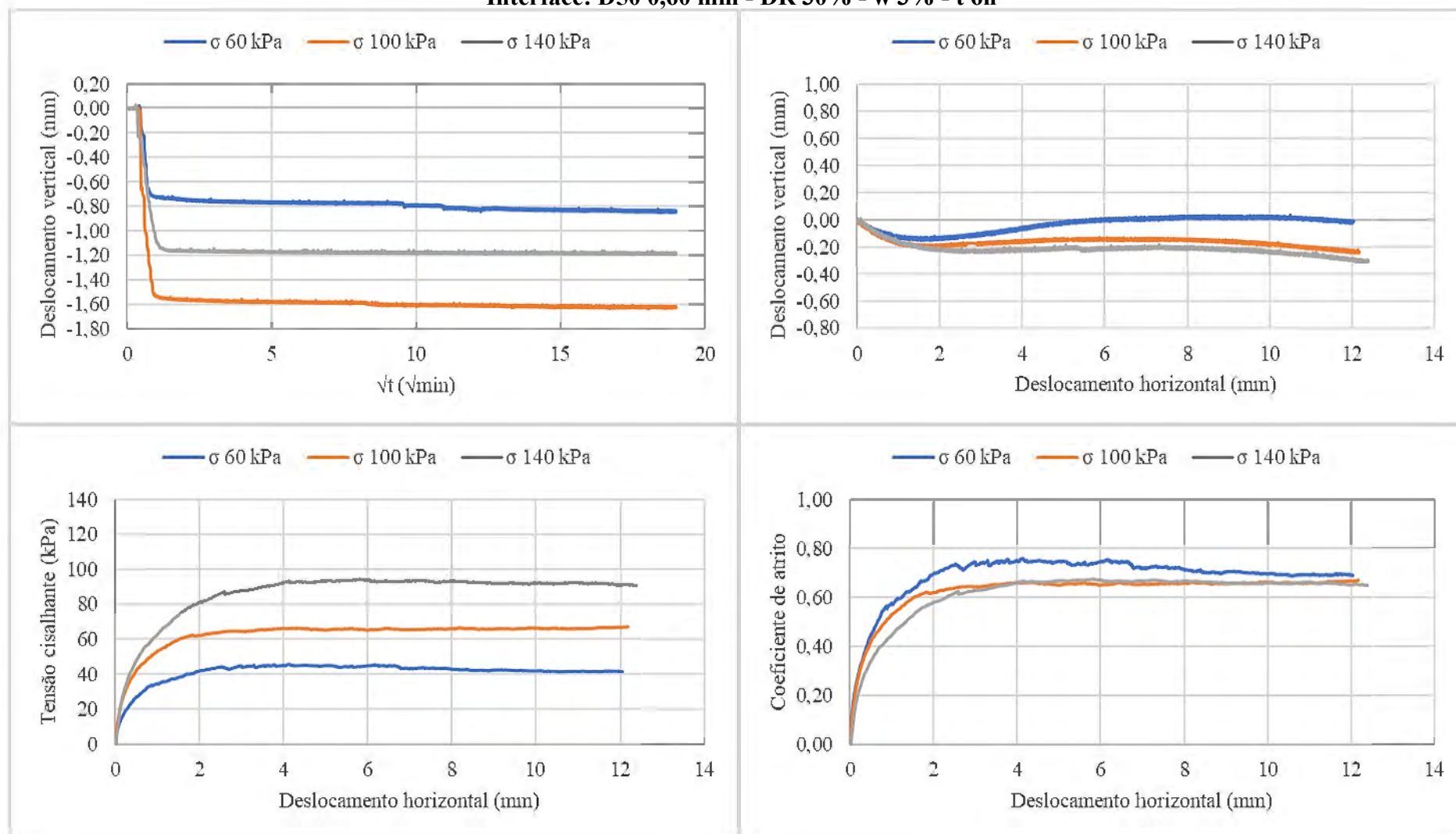
VESIC, A. S. Design of pile foundations. **Synthesis of Highway Practice 42**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 1977.

APÊNDICE 1 - RESULTADOS DO CISALHAMENTO DIRETO

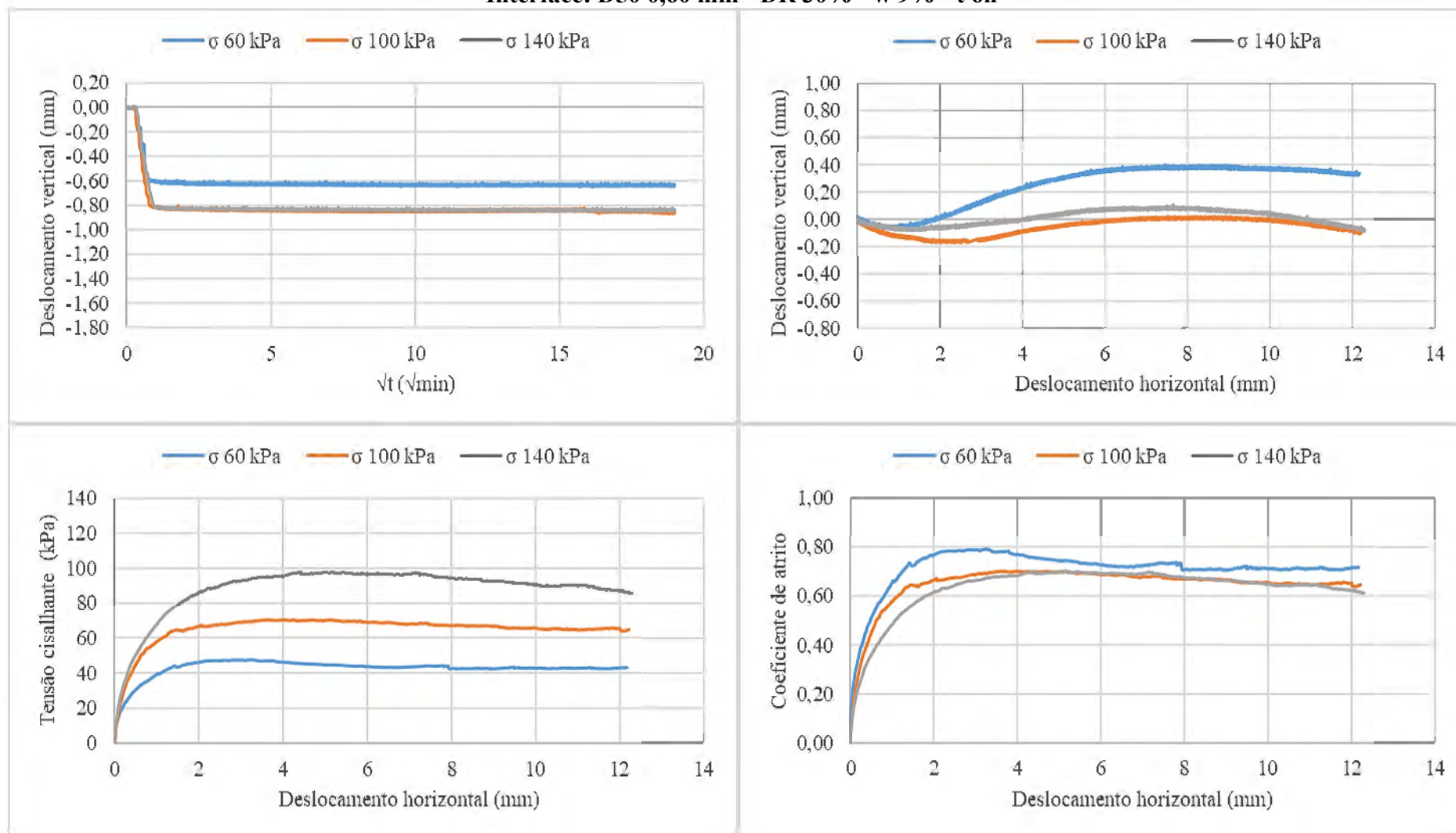
Interface: D50 0,60 mm - DR 50% - w 6% - t 0h



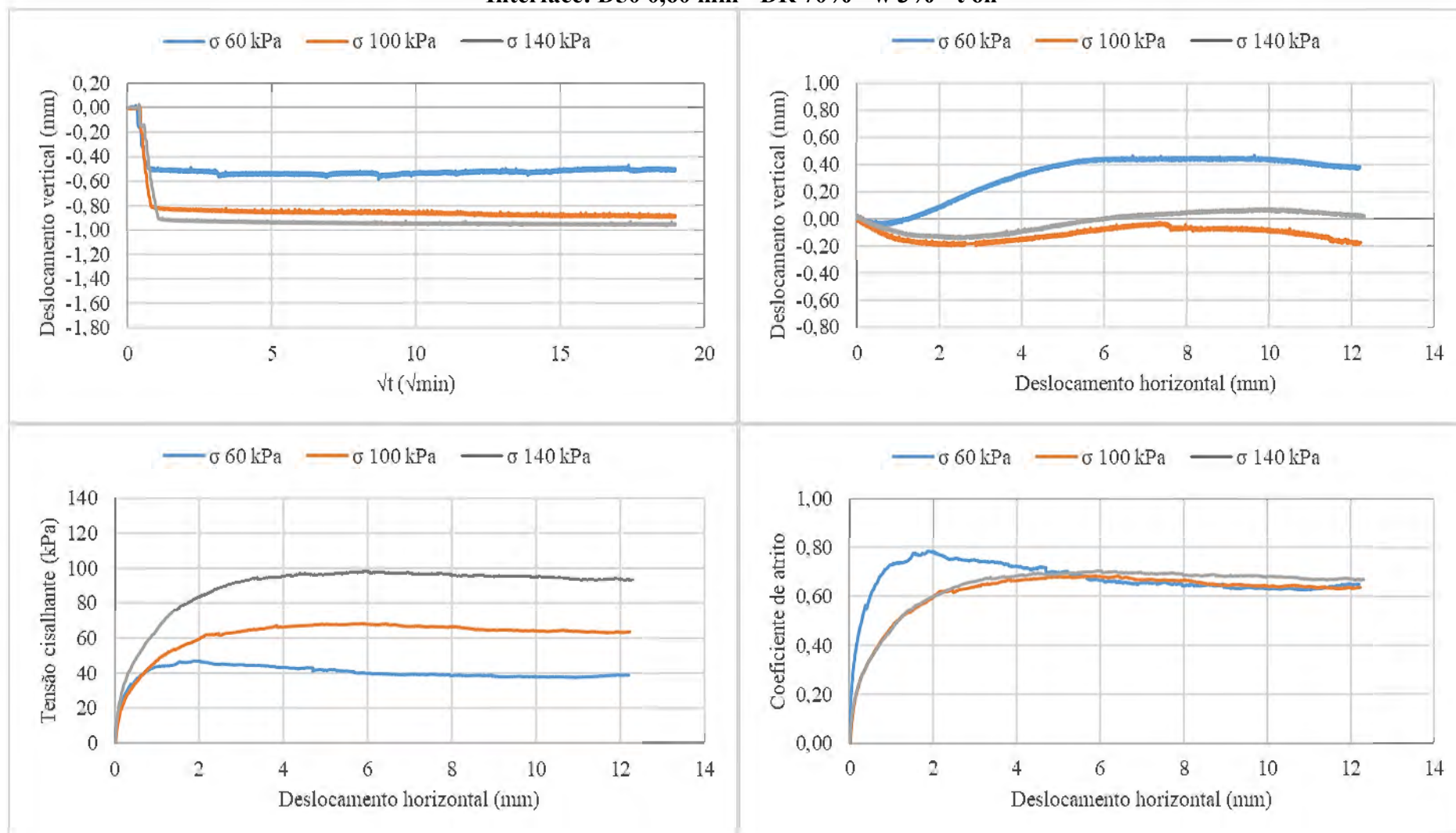
Interface: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 6h



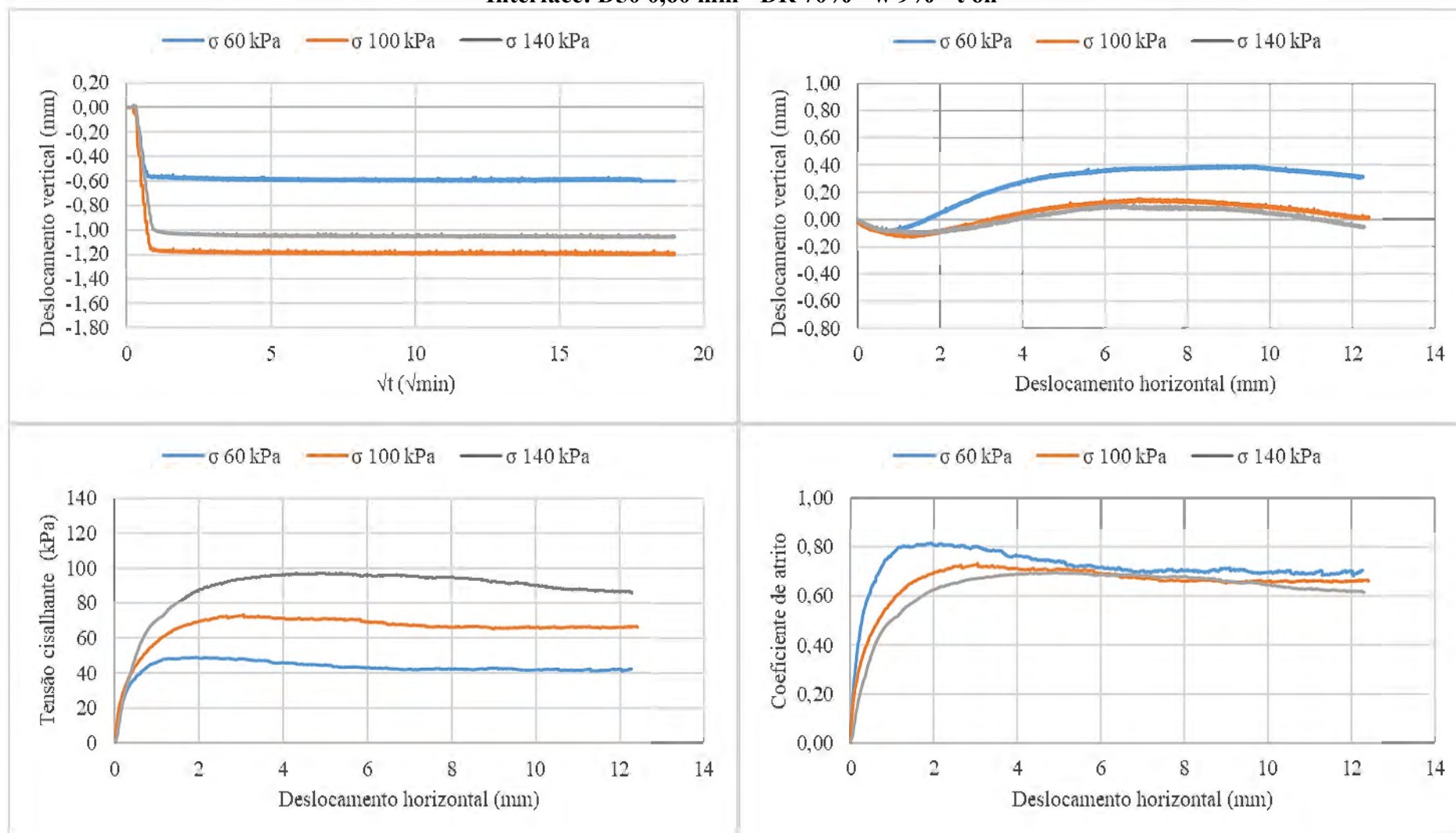
Interface: D50 0,60 mm - DR 30% - w 9% - t 6h

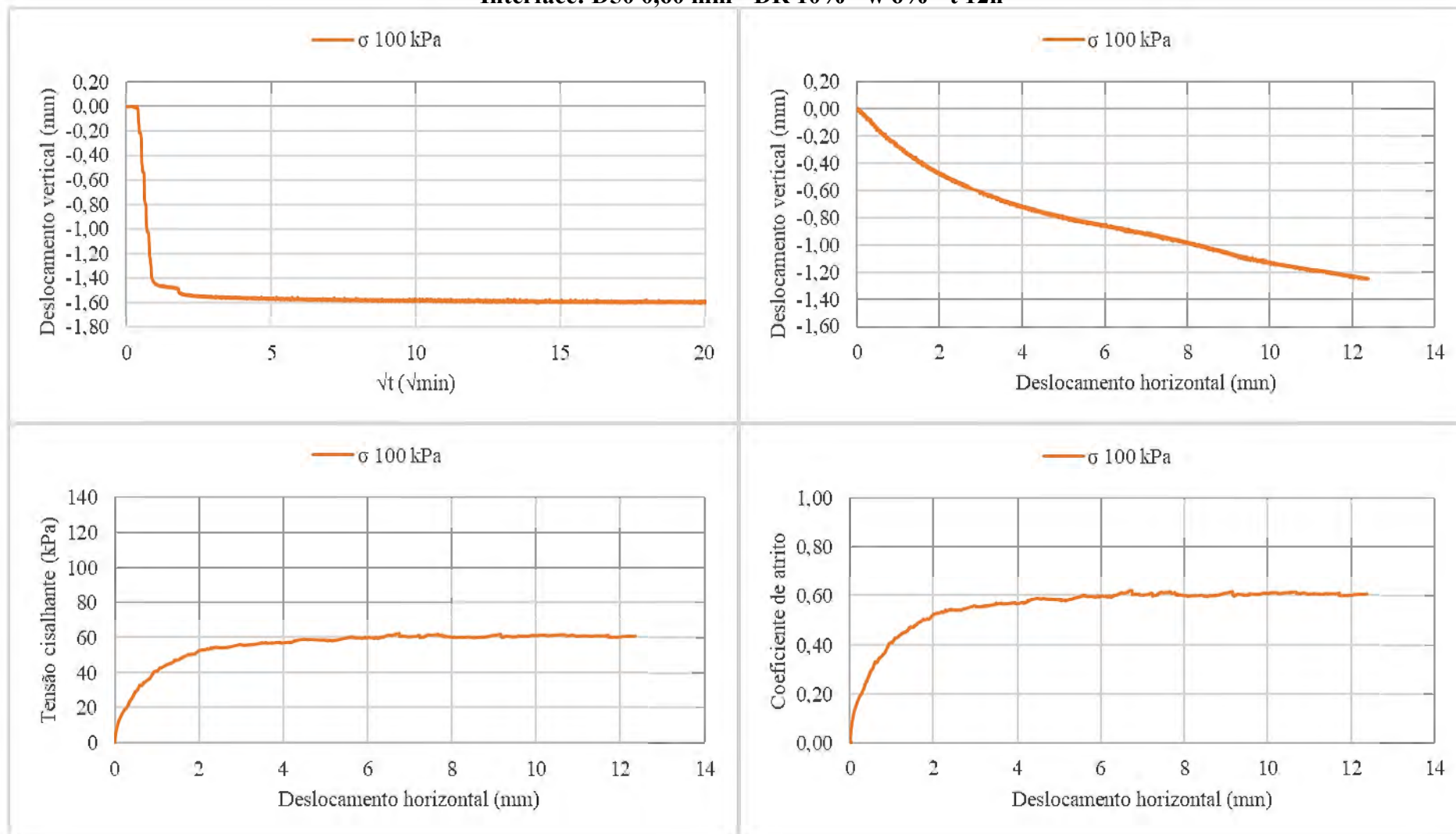


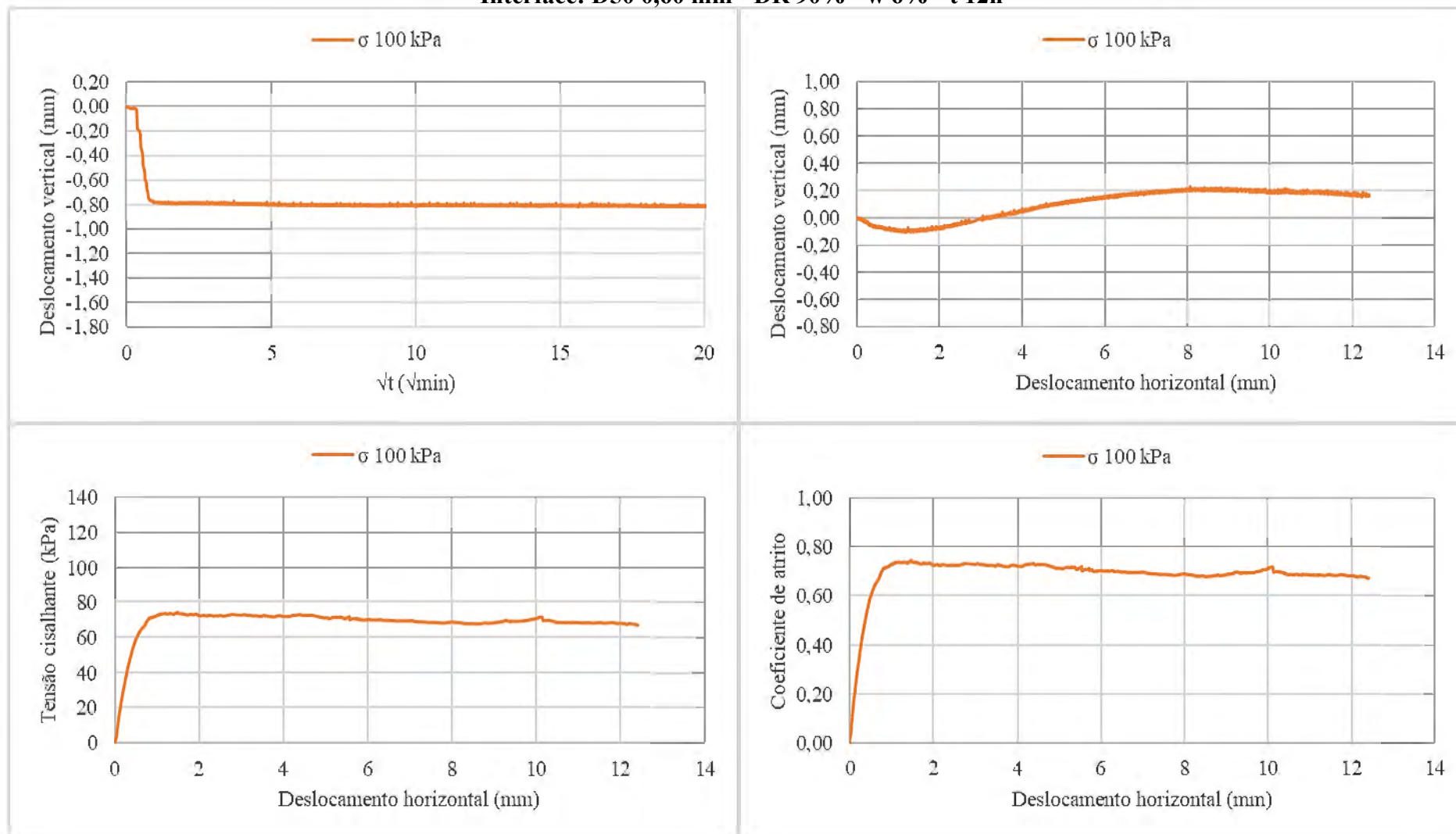
Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 3% - t 6h

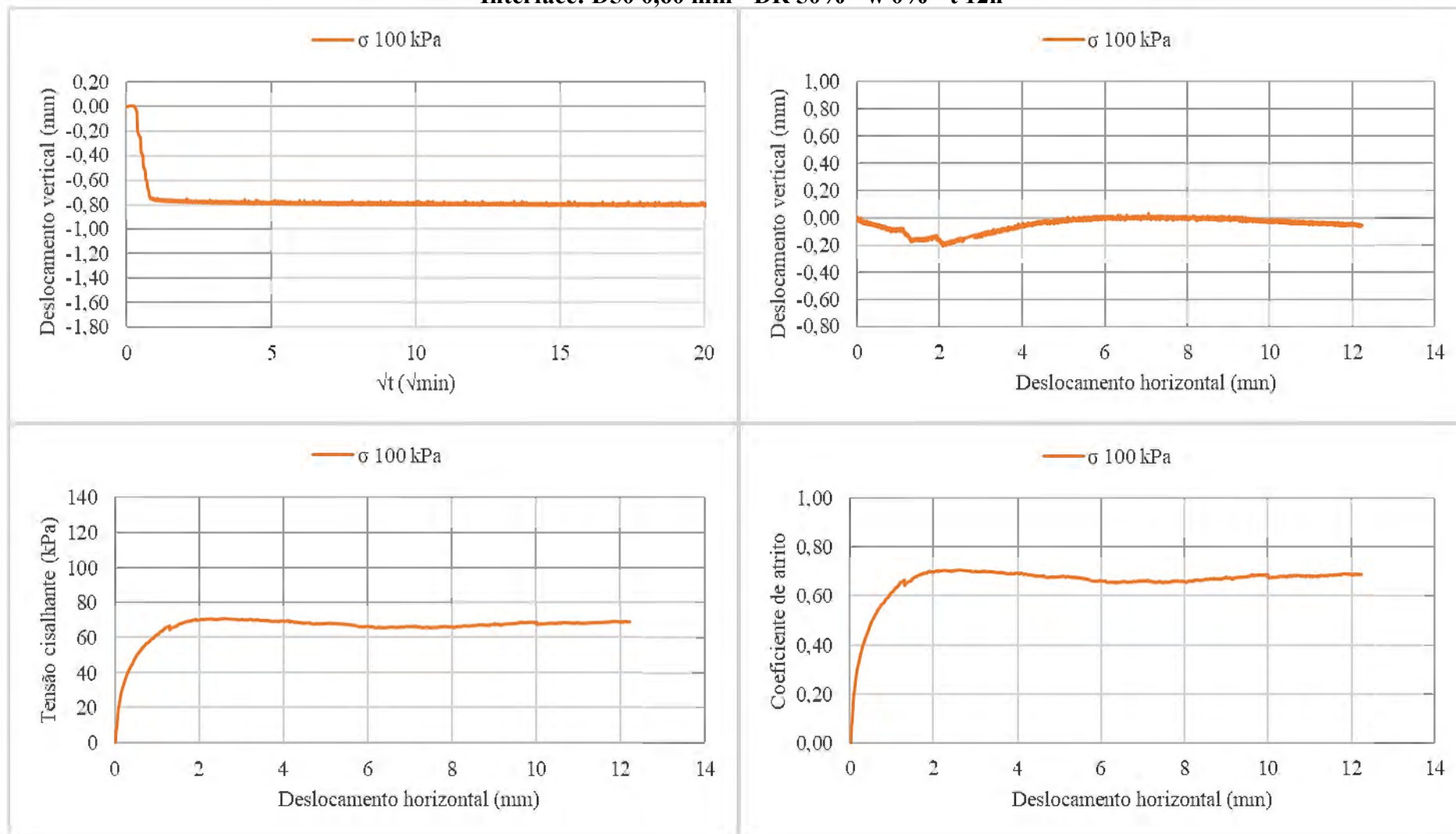


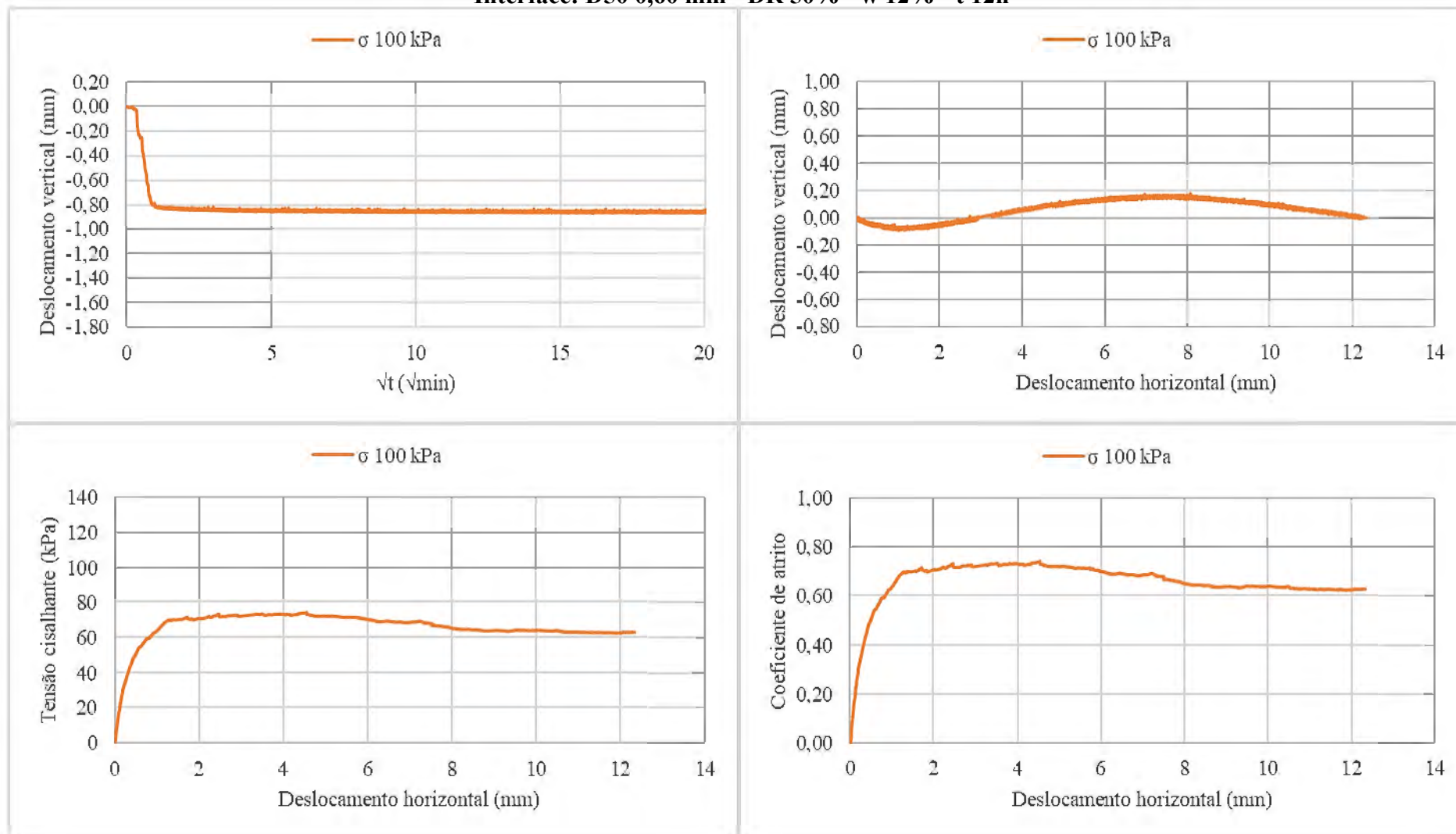
Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 9% - t 6h



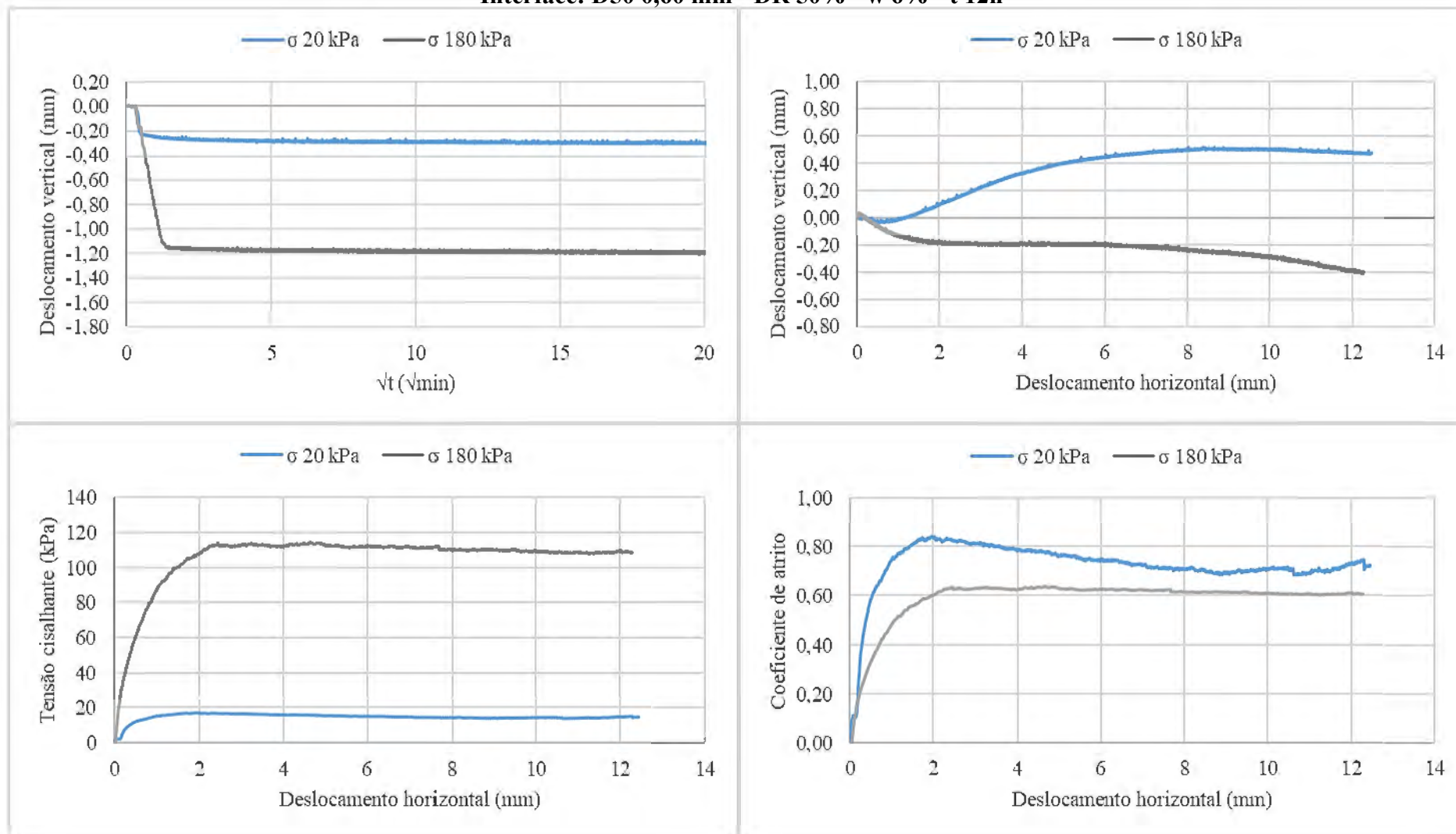
Interface: D50 0,60 mm - DR 10% - w 6% - t 12h

Interface: D50 0,60 mm - DR 90% - w 6% - t 12h

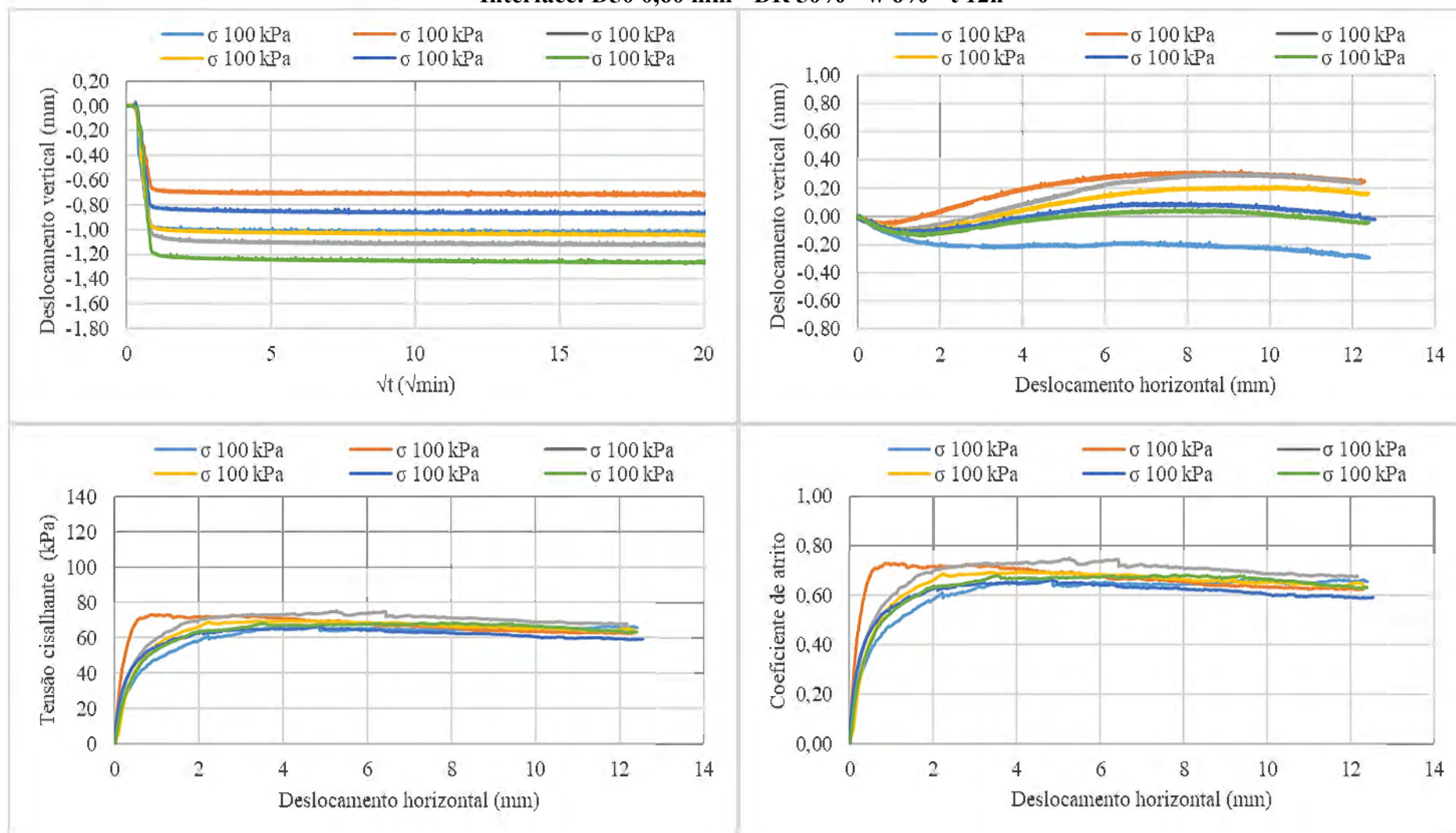
Interface: D50 0,60 mm - DR 50% - w 0% - t 12h

Interface: D50 0,60 mm - DR 50% - w 12% - t 12h

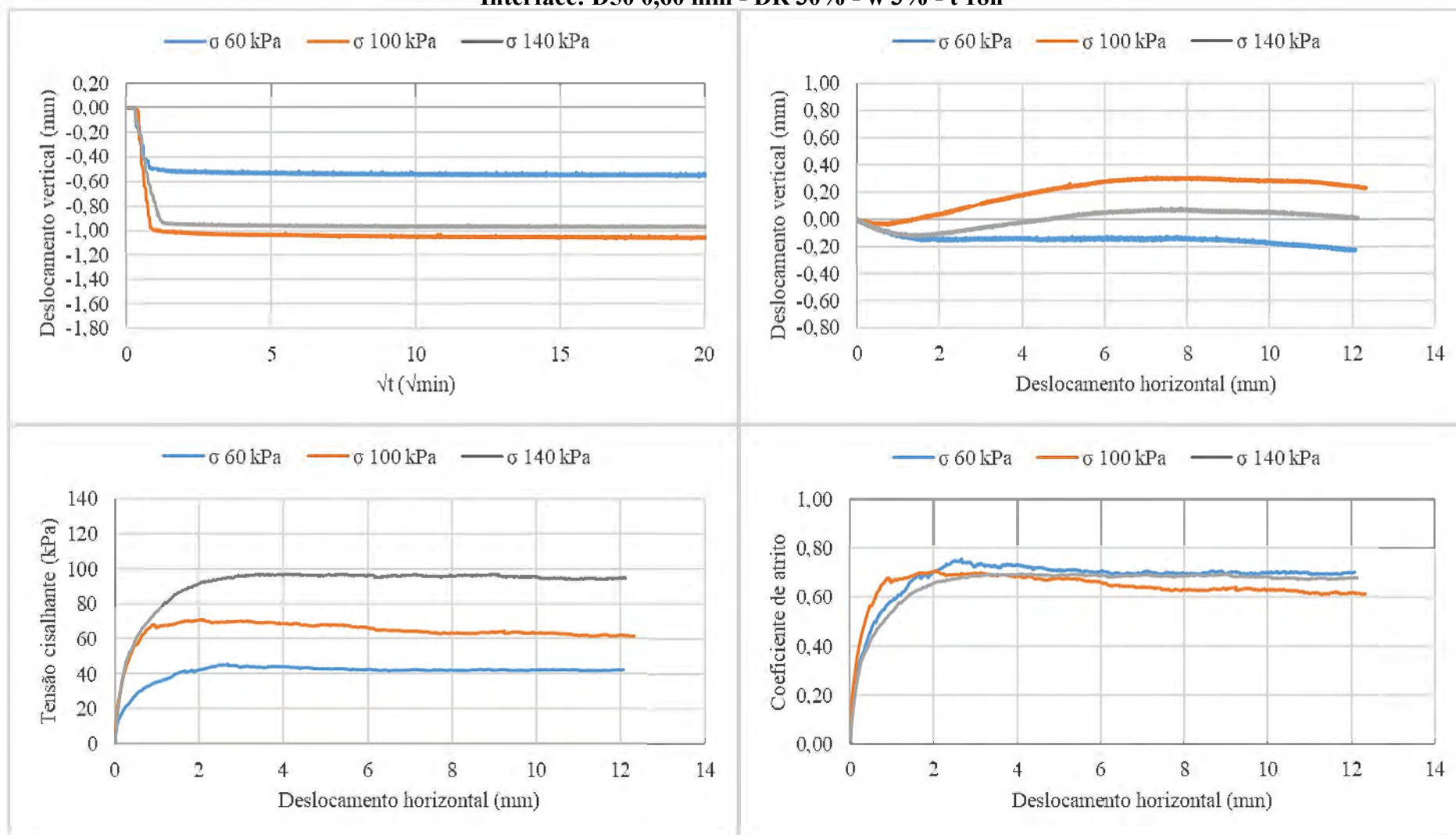
Interface: D50 0,60 mm - DR 50% - w 6% - t 12h



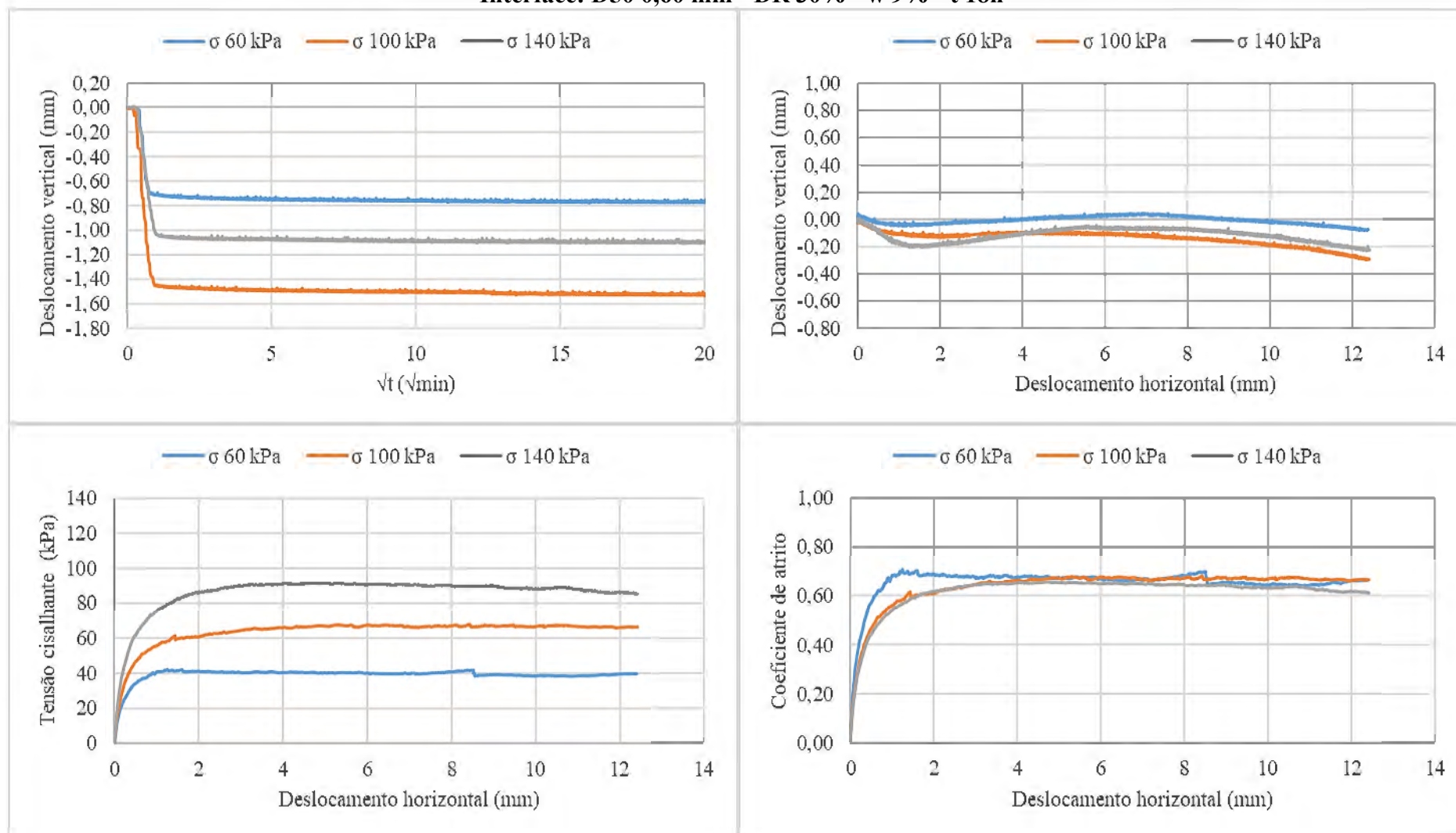
Interface: D50 0,60 mm - DR 50% - w 6% - t 12h



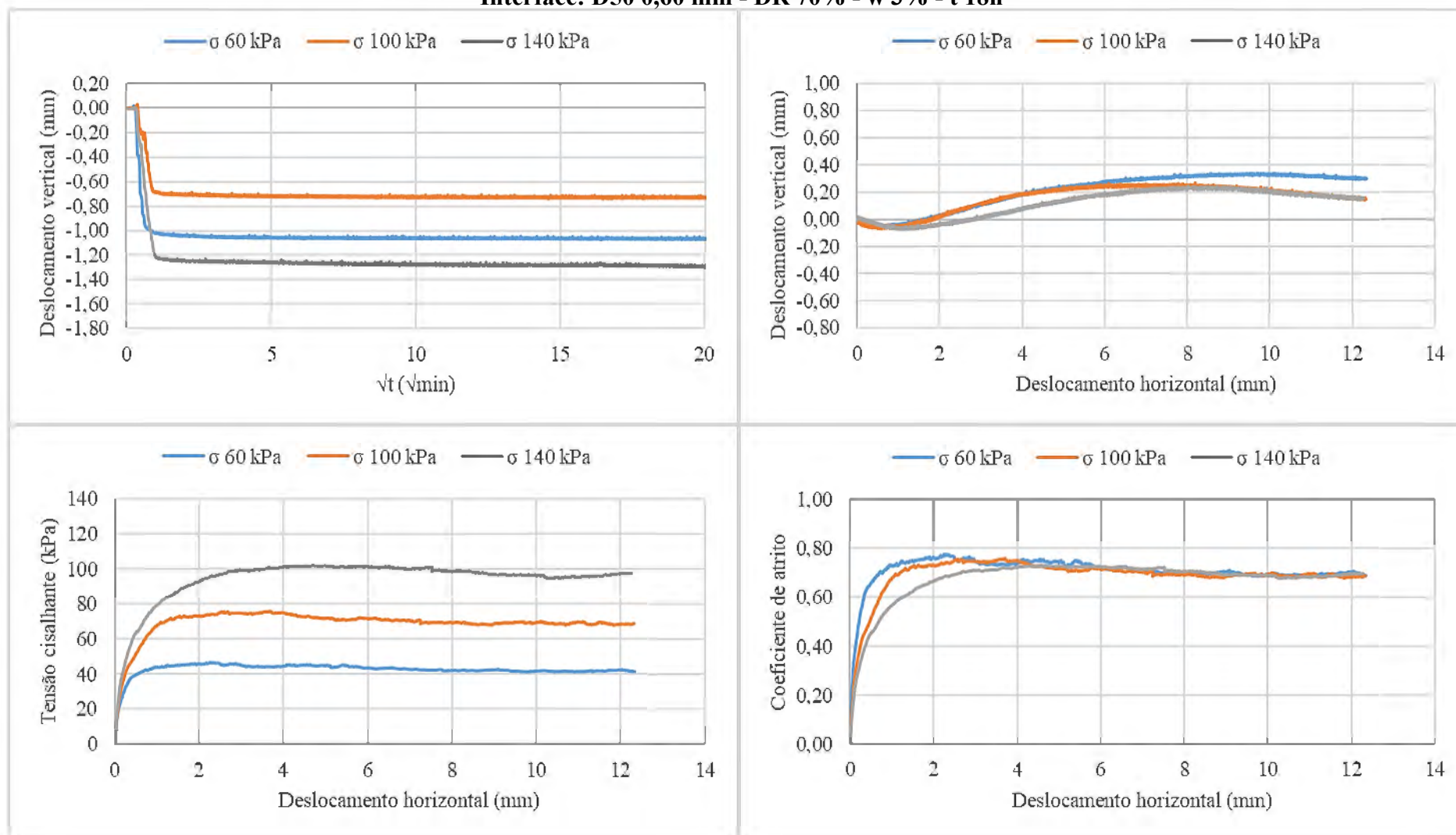
Interface: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 18h



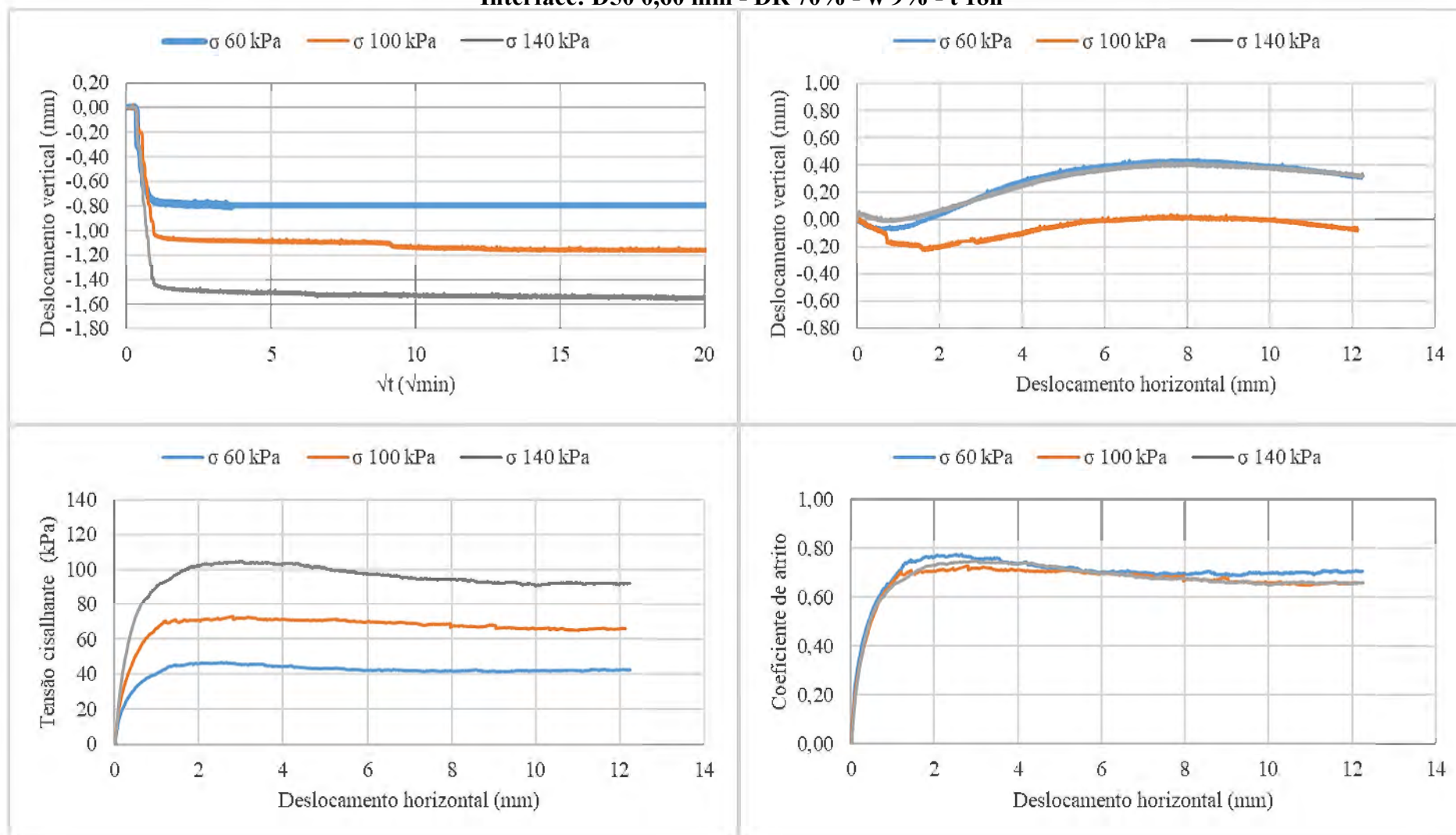
Interface: D50 0,60 mm - DR 30% - w 9% - t 18h

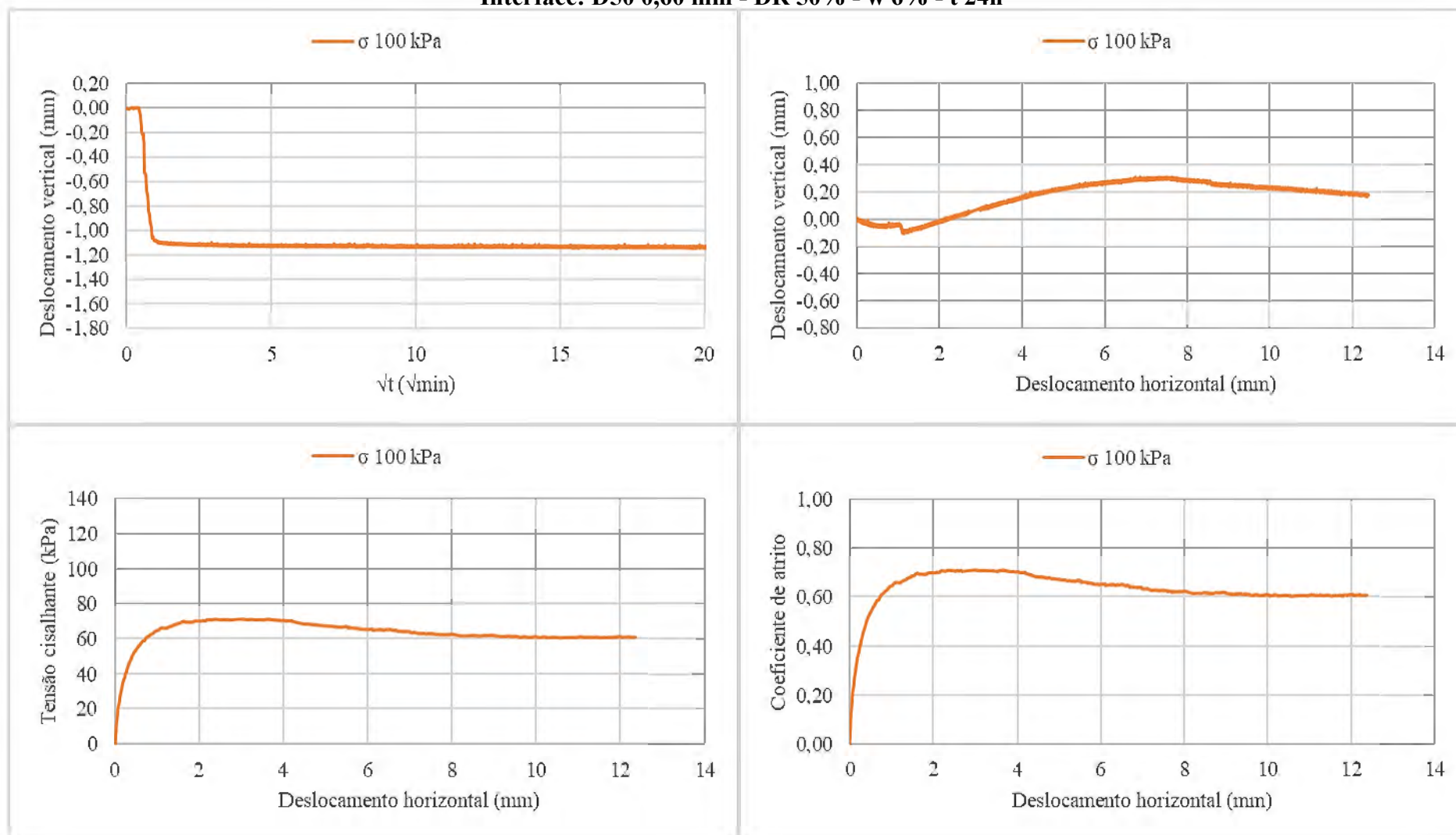


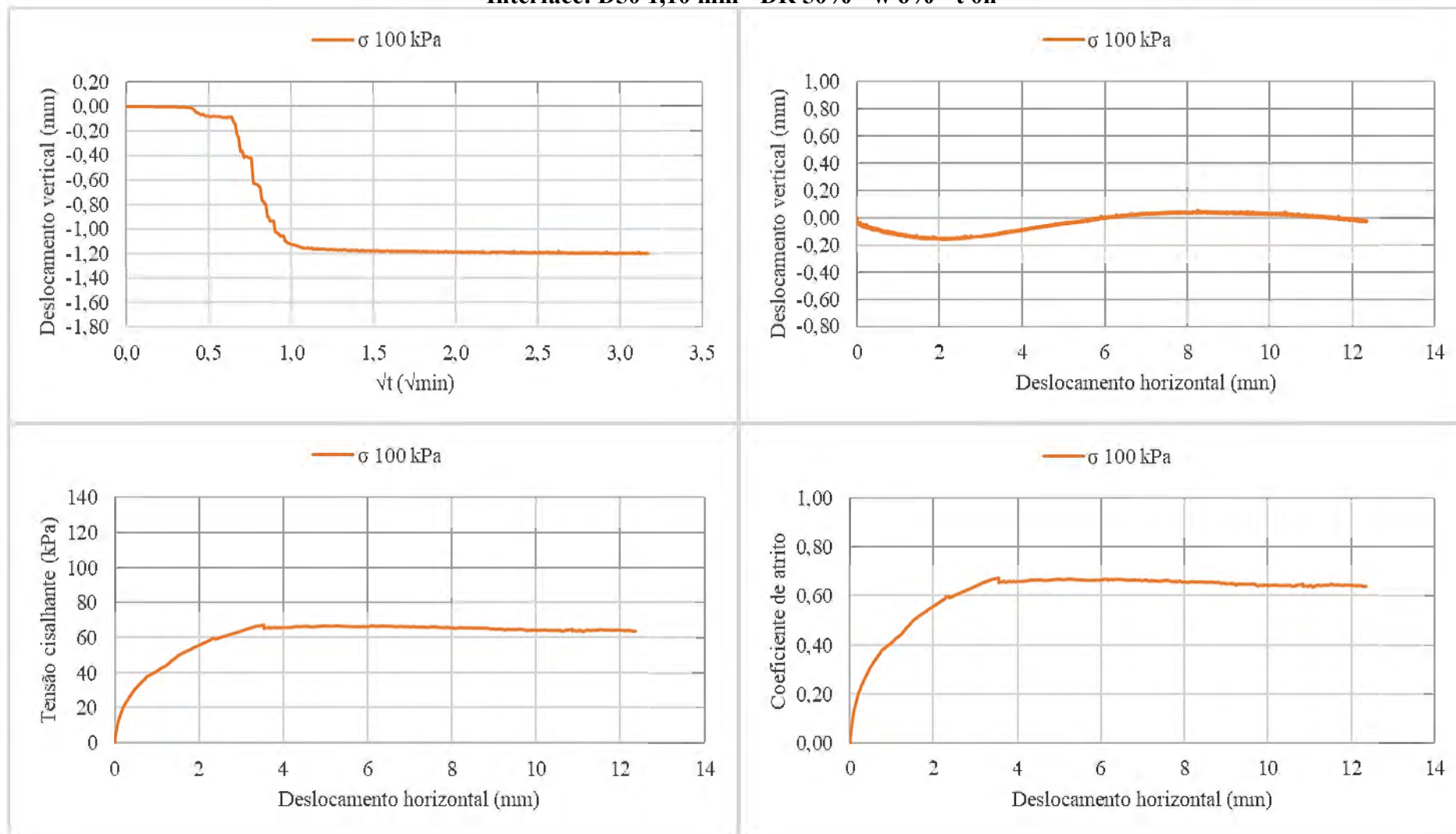
Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 3% - t 18h



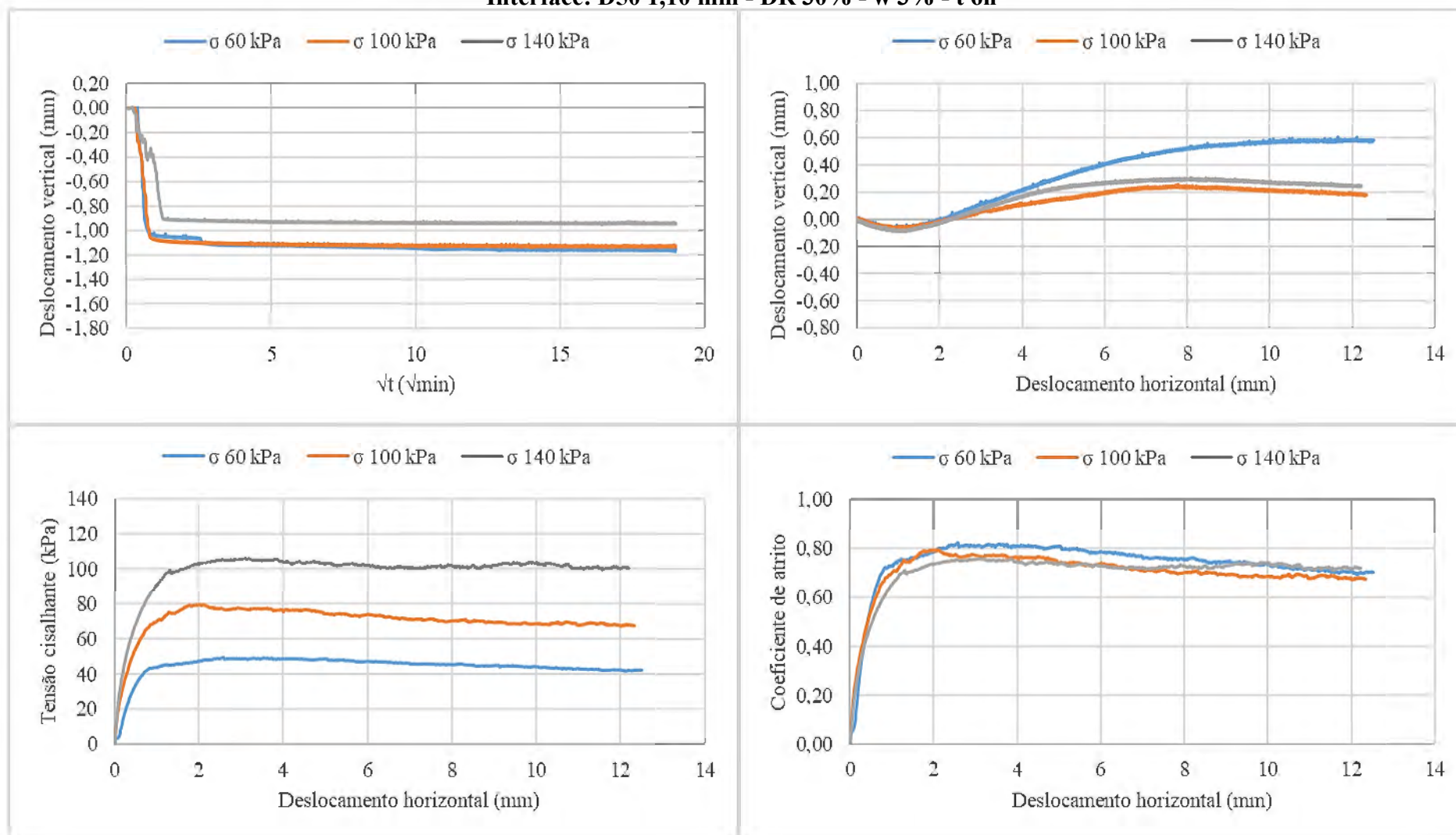
Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 9% - t 18h



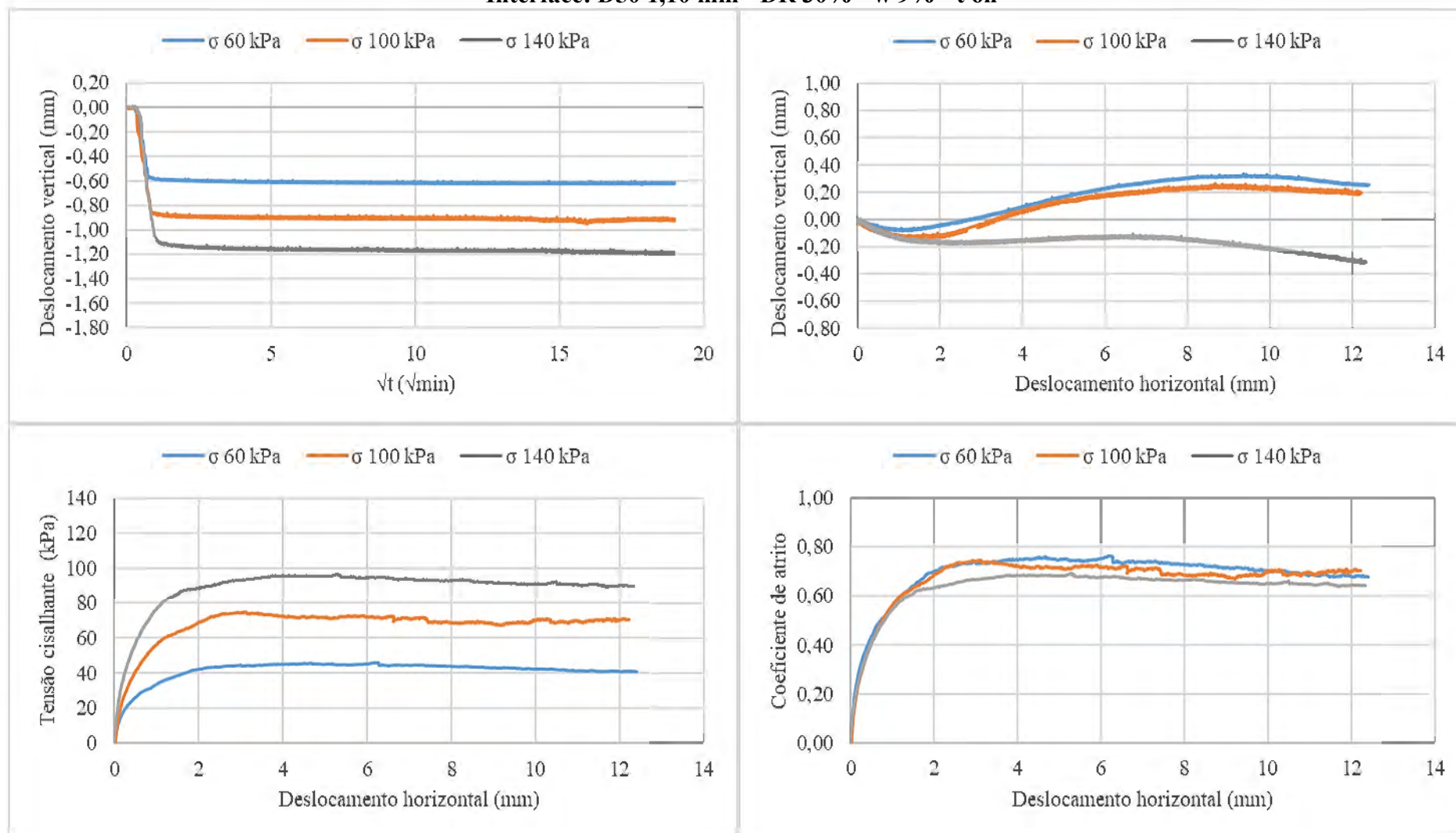
Interface: D50 0,60 mm - DR 50% - w 6% - t 24h

Interface: D50 1,10 mm - DR 50% - w 6% - t 0h

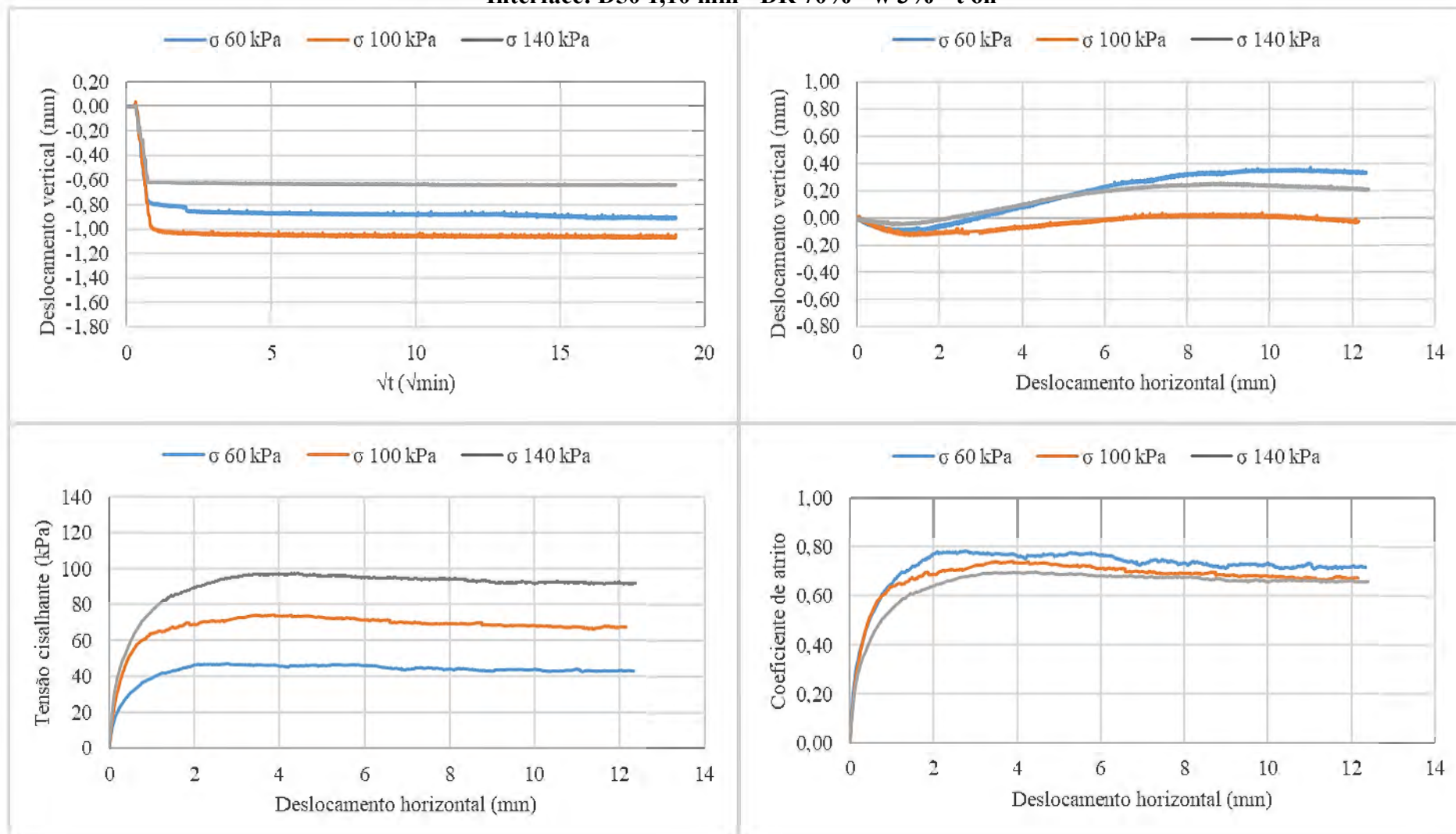
Interface: D50 1,10 mm - DR 30% - w 3% - t 6h



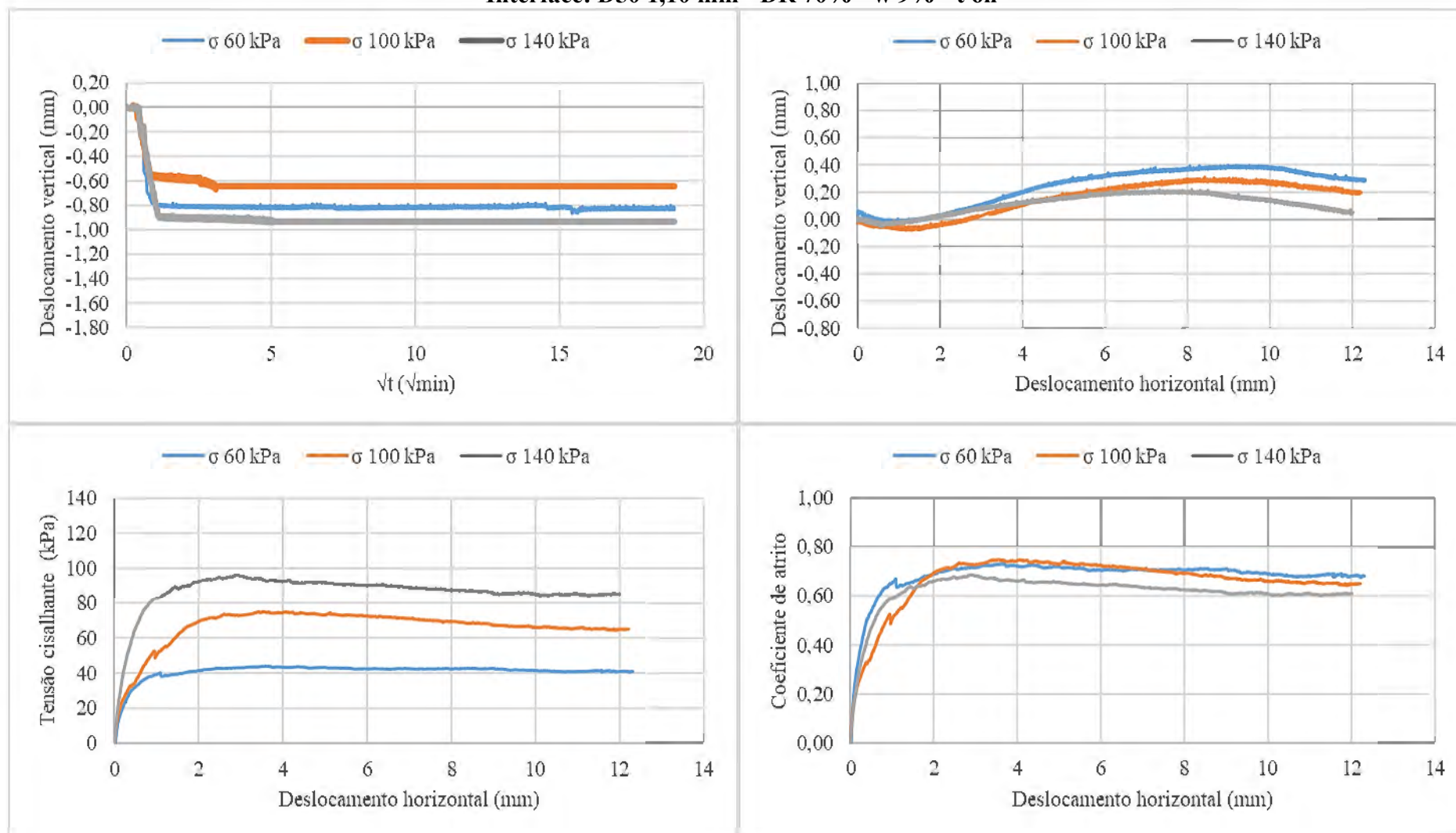
Interface: D50 1,10 mm - DR 30% - w 9% - t 6h

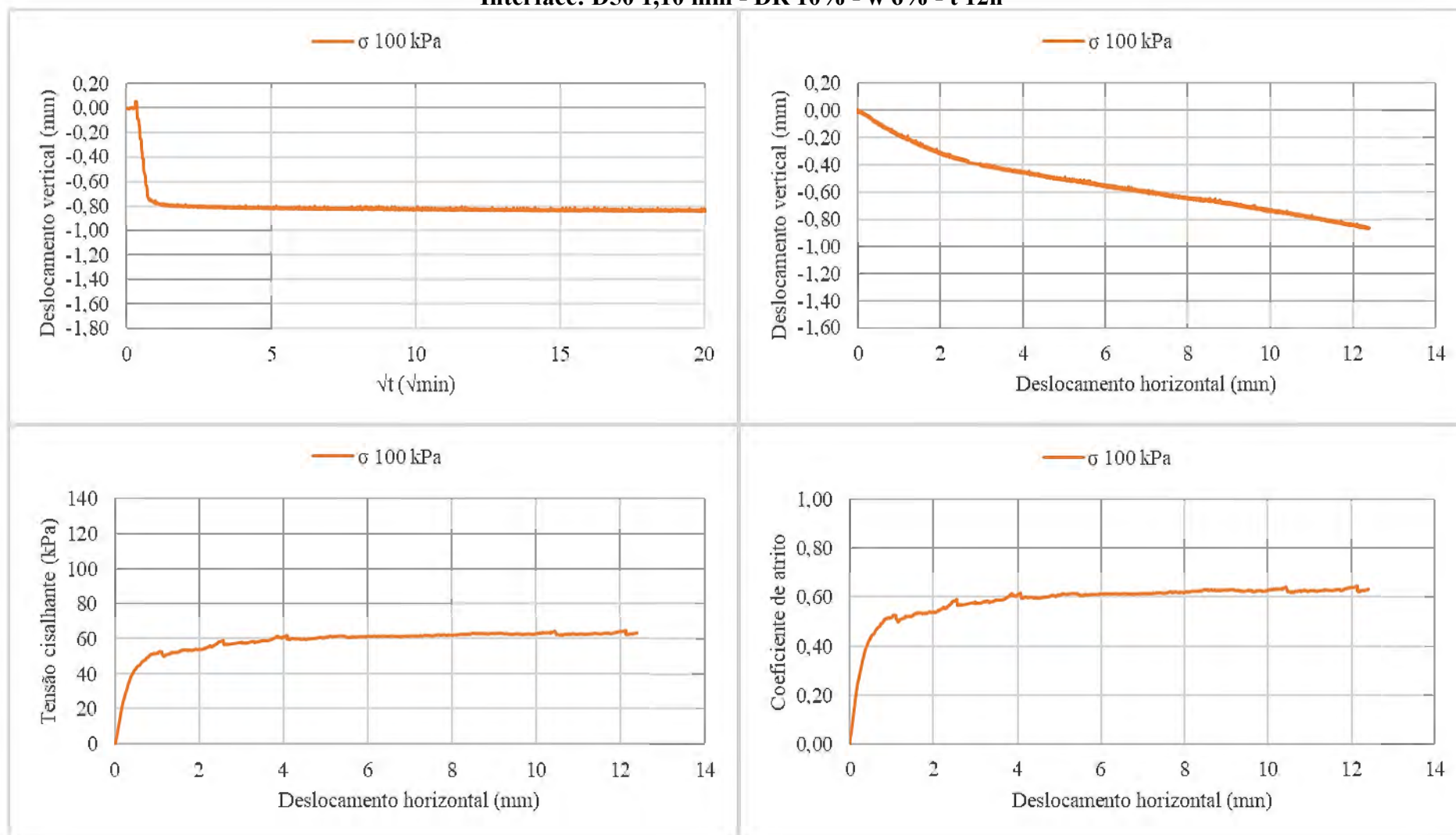


Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 6h

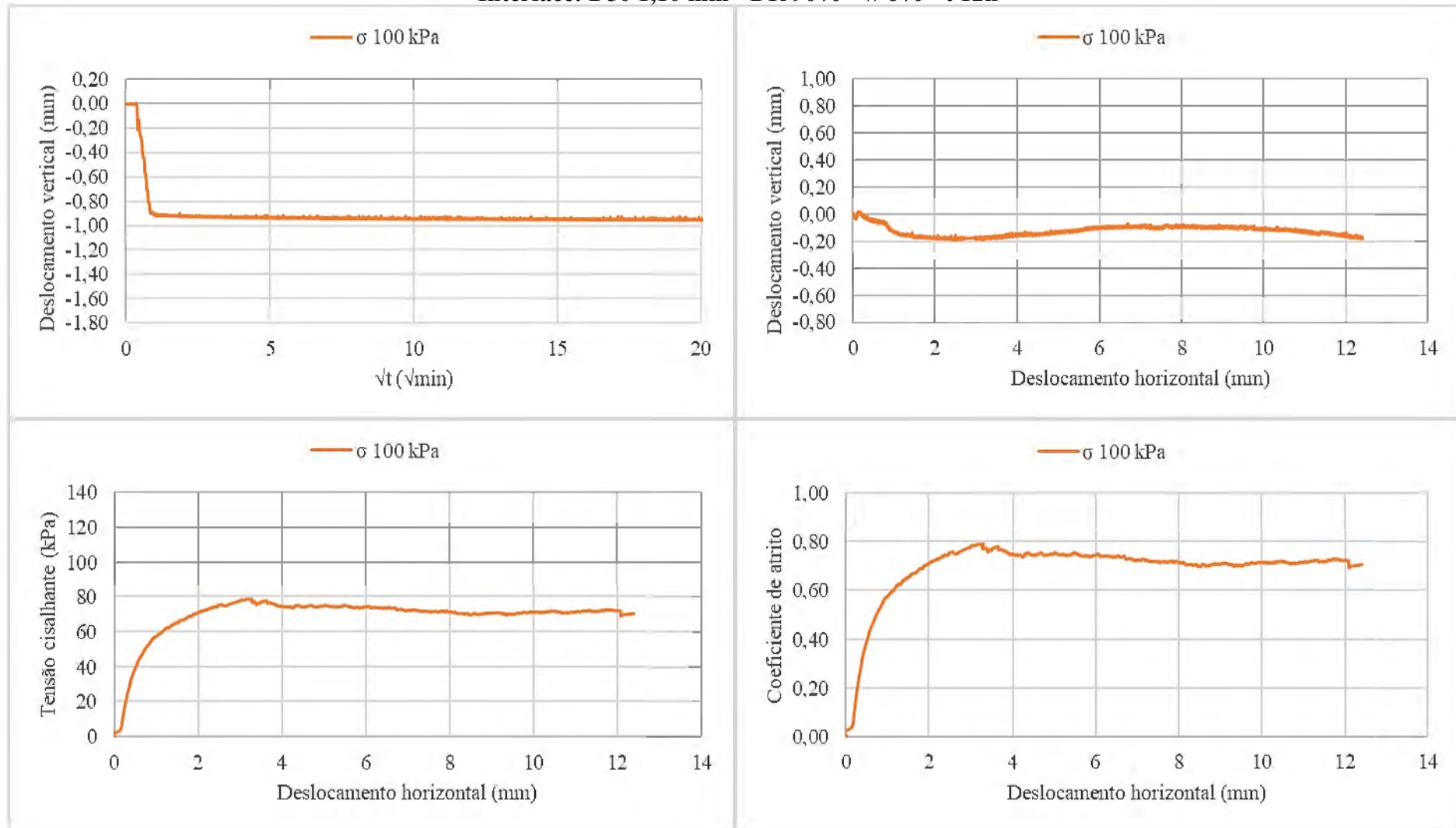


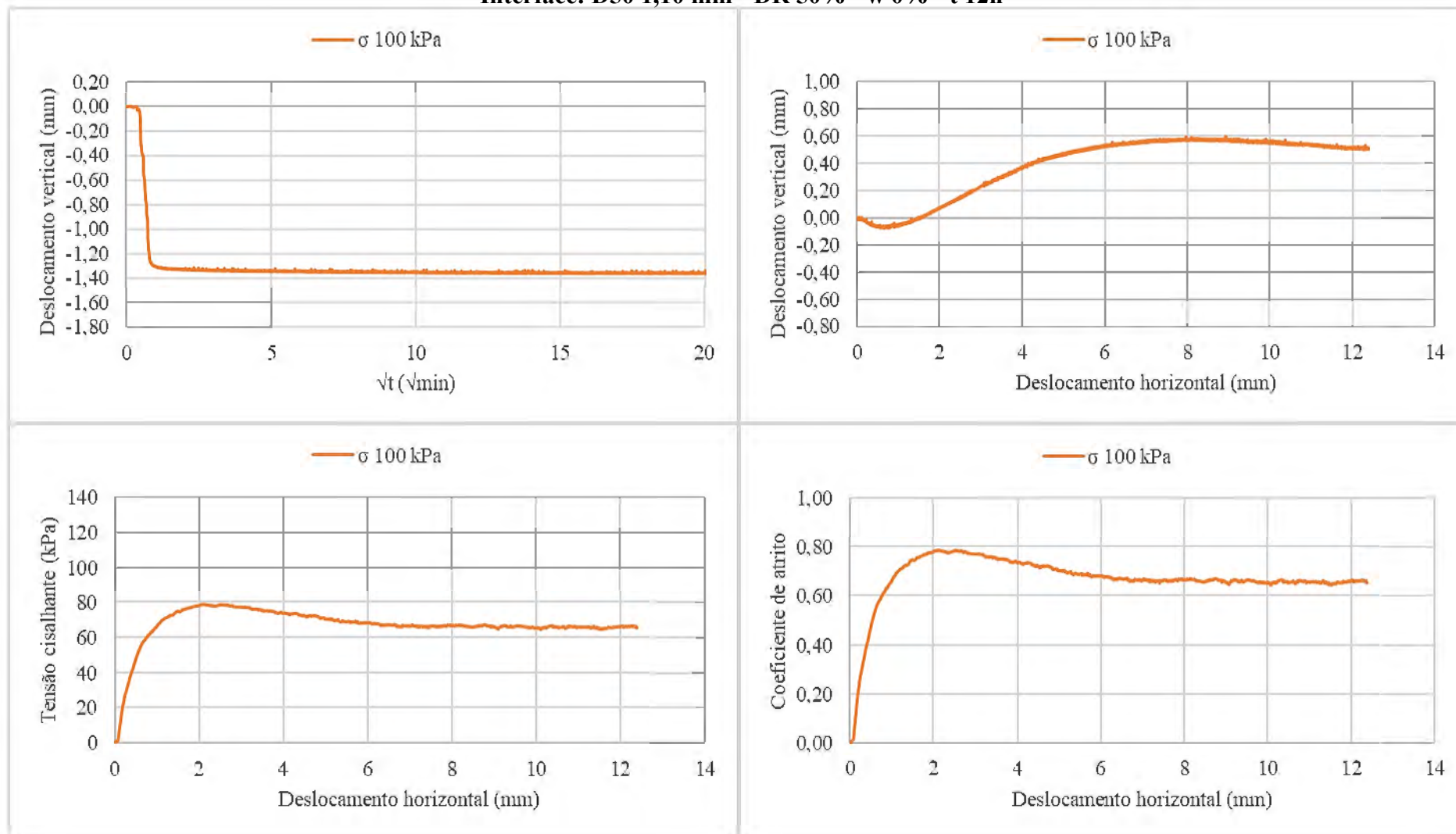
Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 9% - t 6h



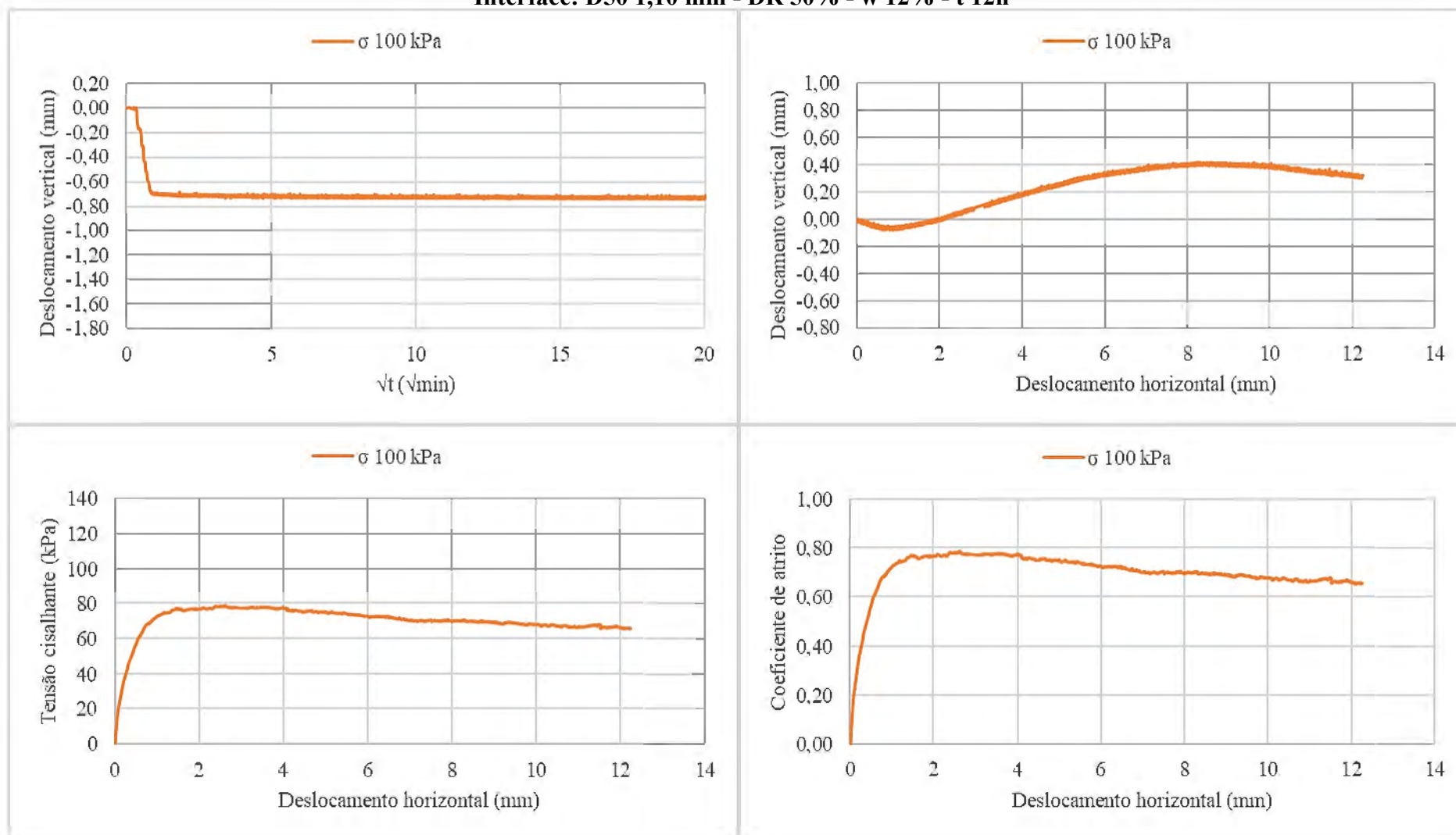
Interface: D50 1,10 mm - DR 10% - w 6% - t 12h

Interface: D50 1,10 mm - DR 90% - w 6% - t 12h

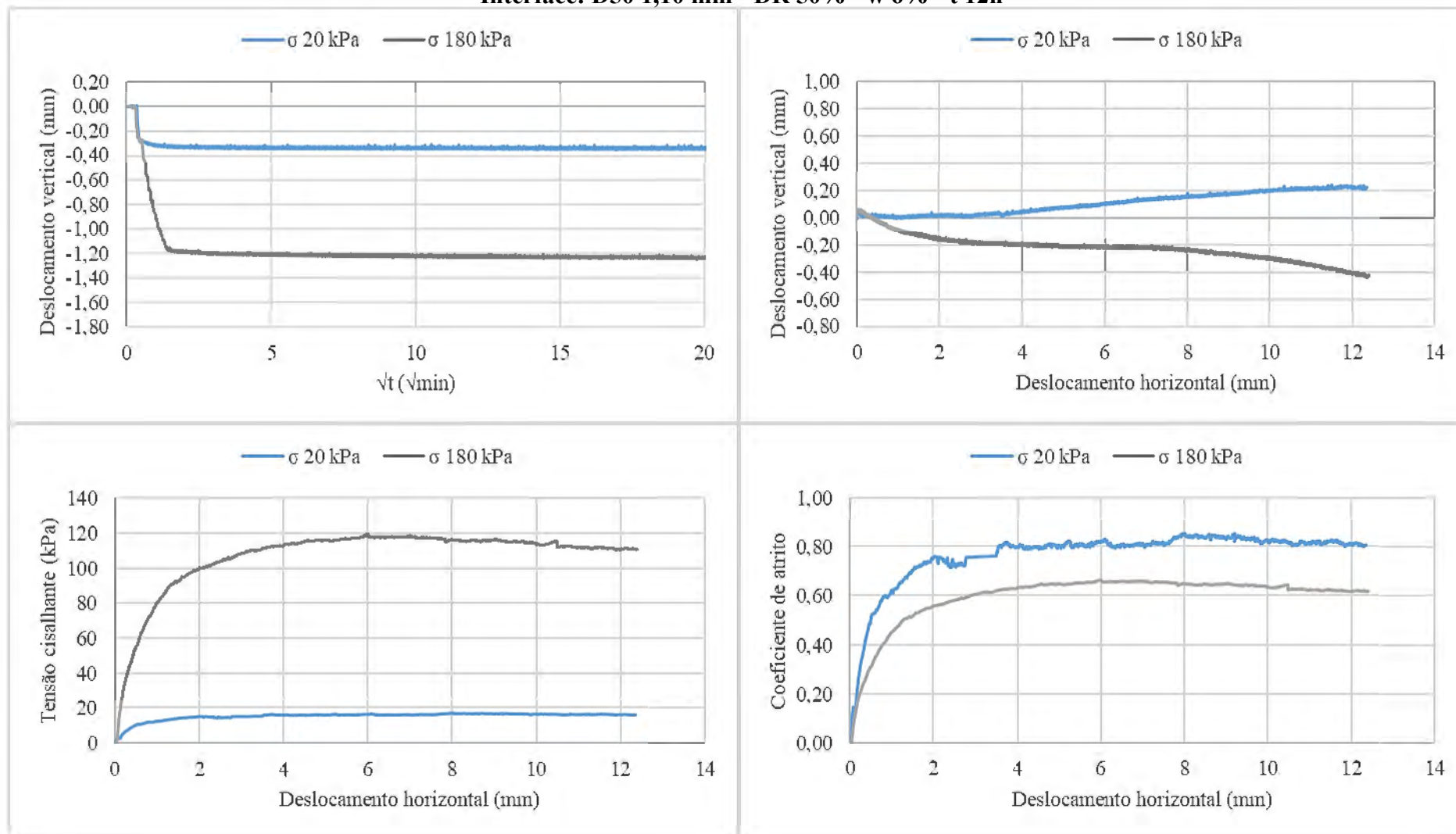


Interface: D50 1,10 mm - DR 50% - w 0% - t 12h

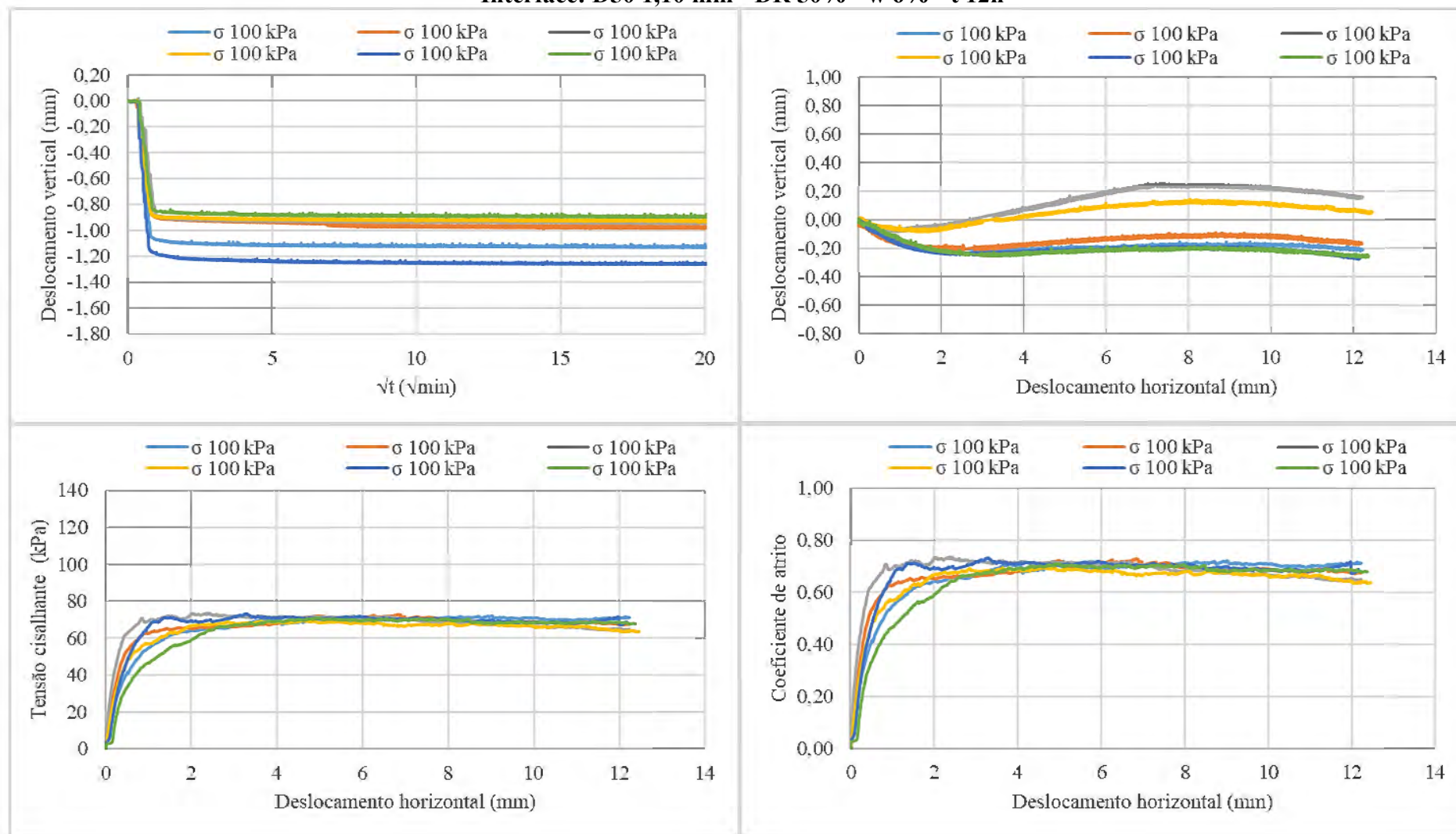
Interface: D50 1,10 mm - DR 50% - w 12% - t 12h



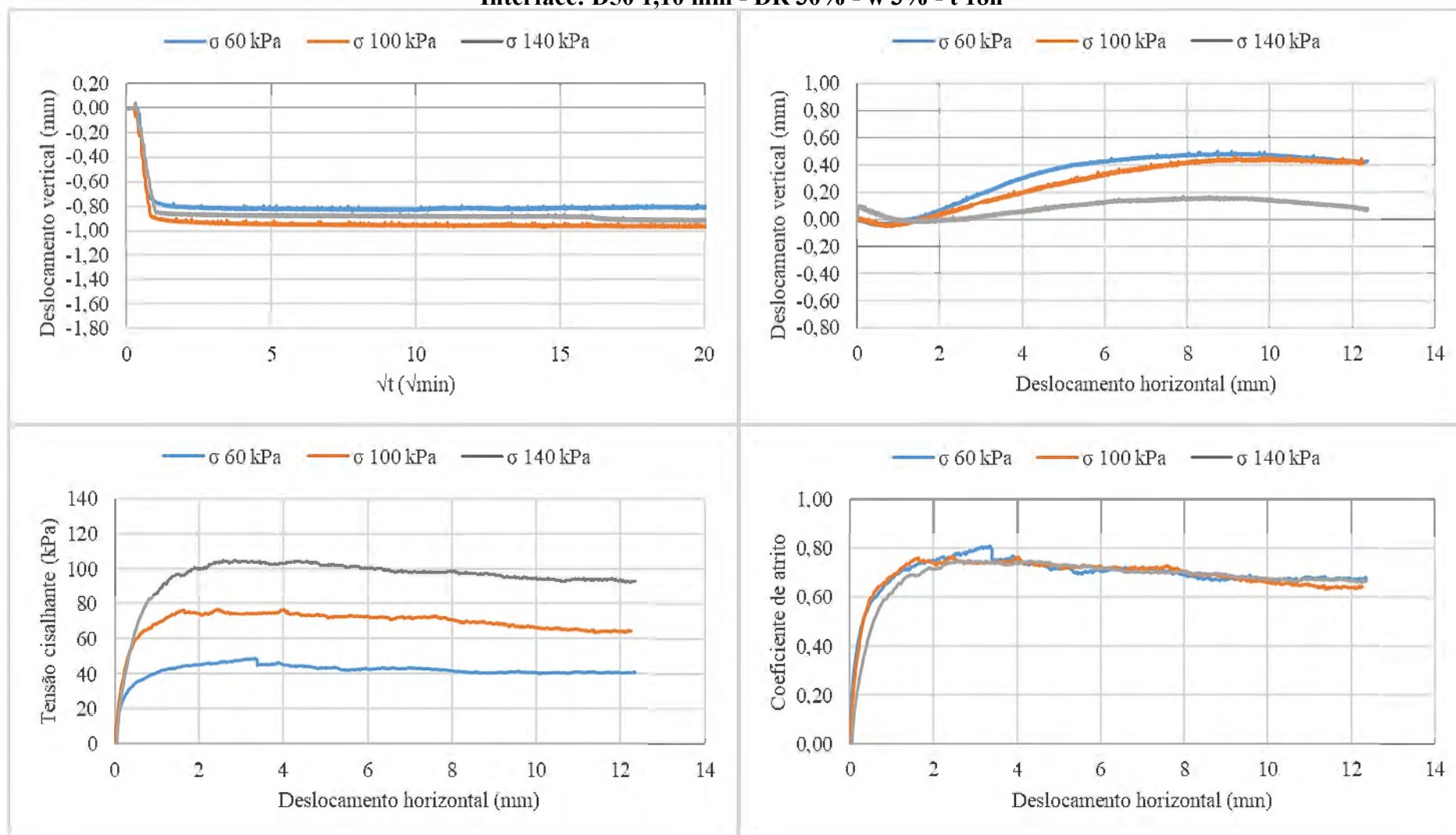
Interface: D50 1,10 mm - DR 50% - w 6% - t 12h



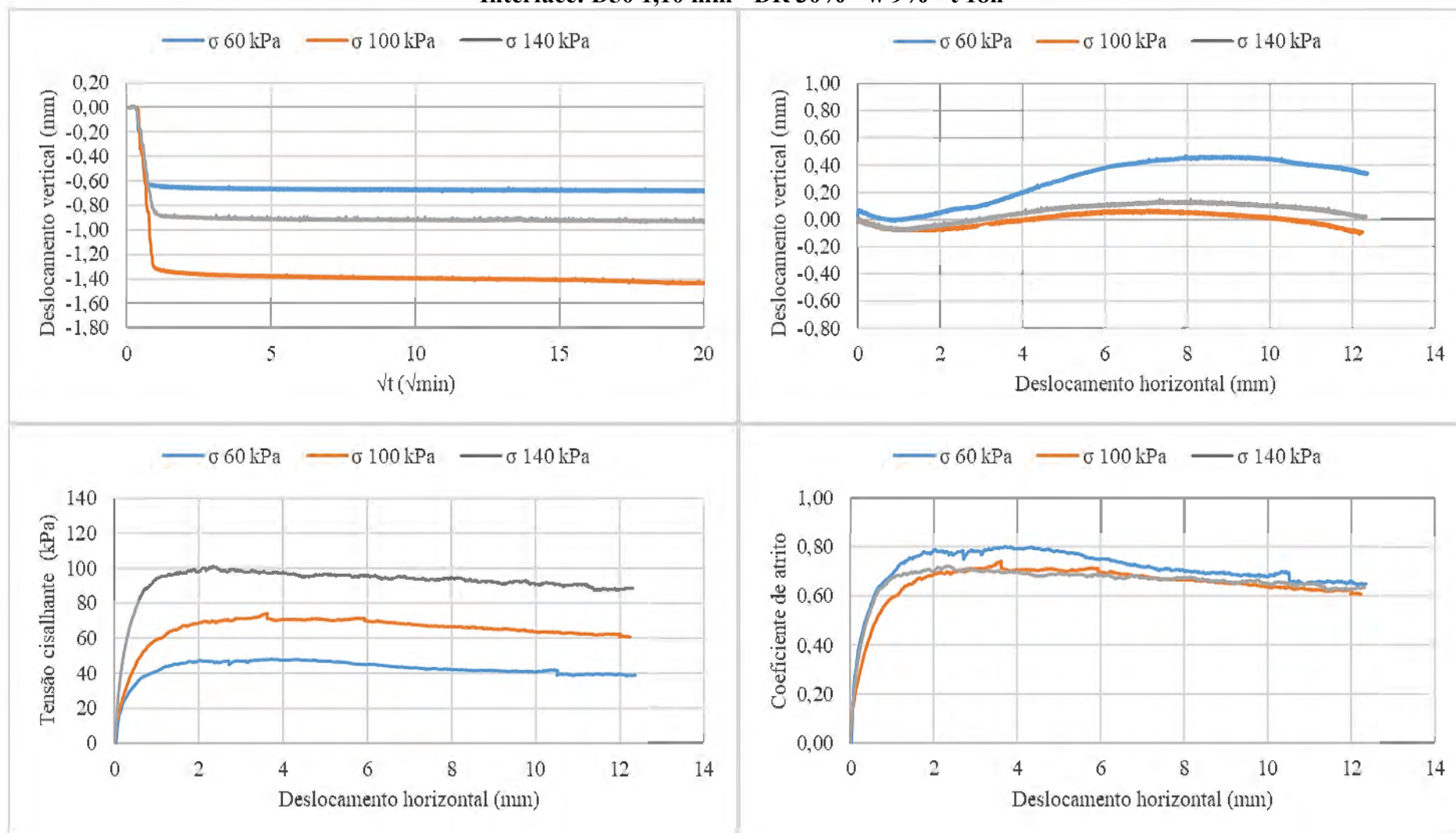
Interface: D50 1,10 mm - DR 50% - w 6% - t 12h



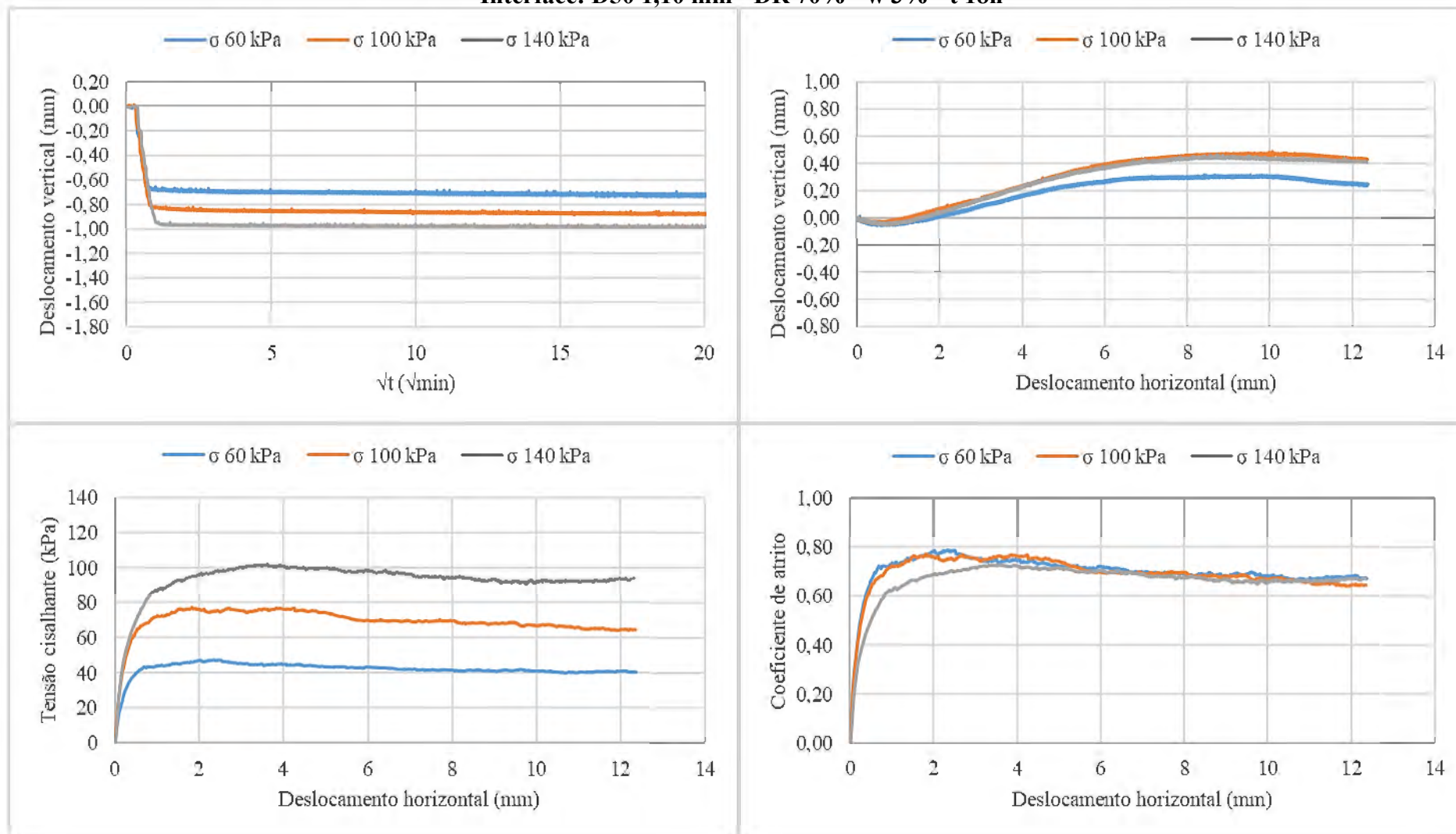
Interface: D50 1,10 mm - DR 30% - w 3% - t 18h



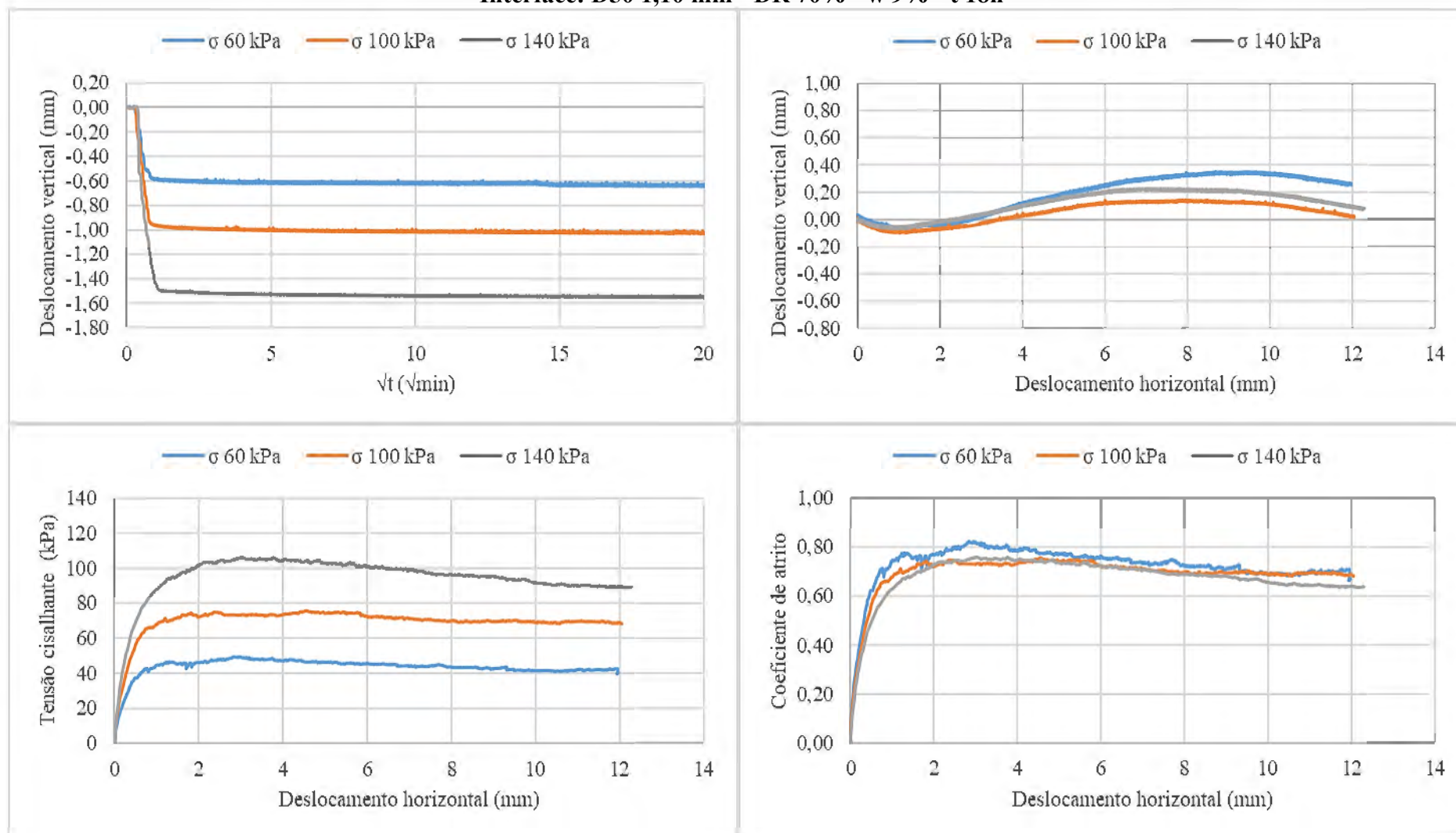
Interface: D50 1,10 mm - DR 30% - w 9% - t 18h



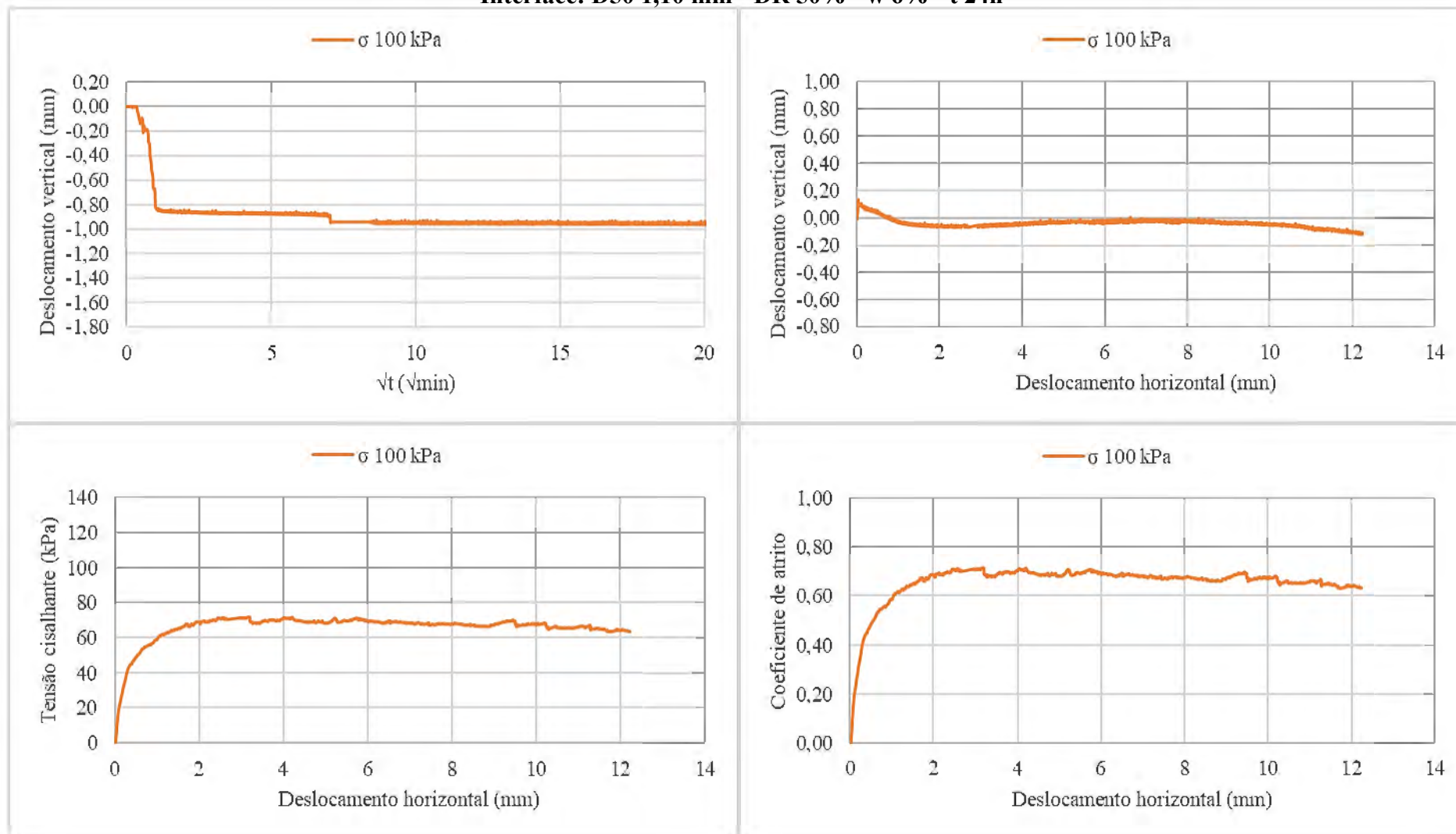
Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 18h



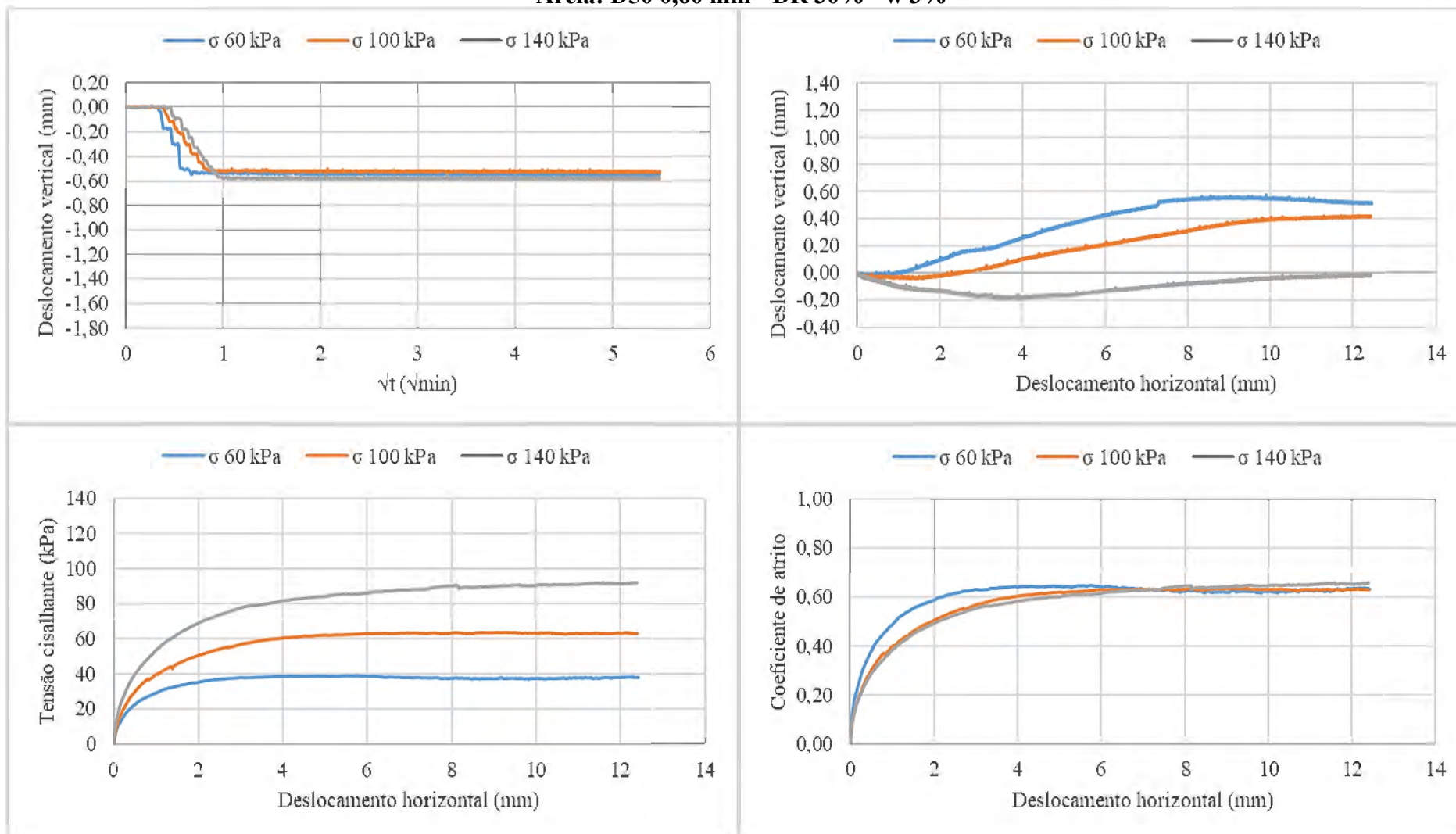
Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 9% - t 18h



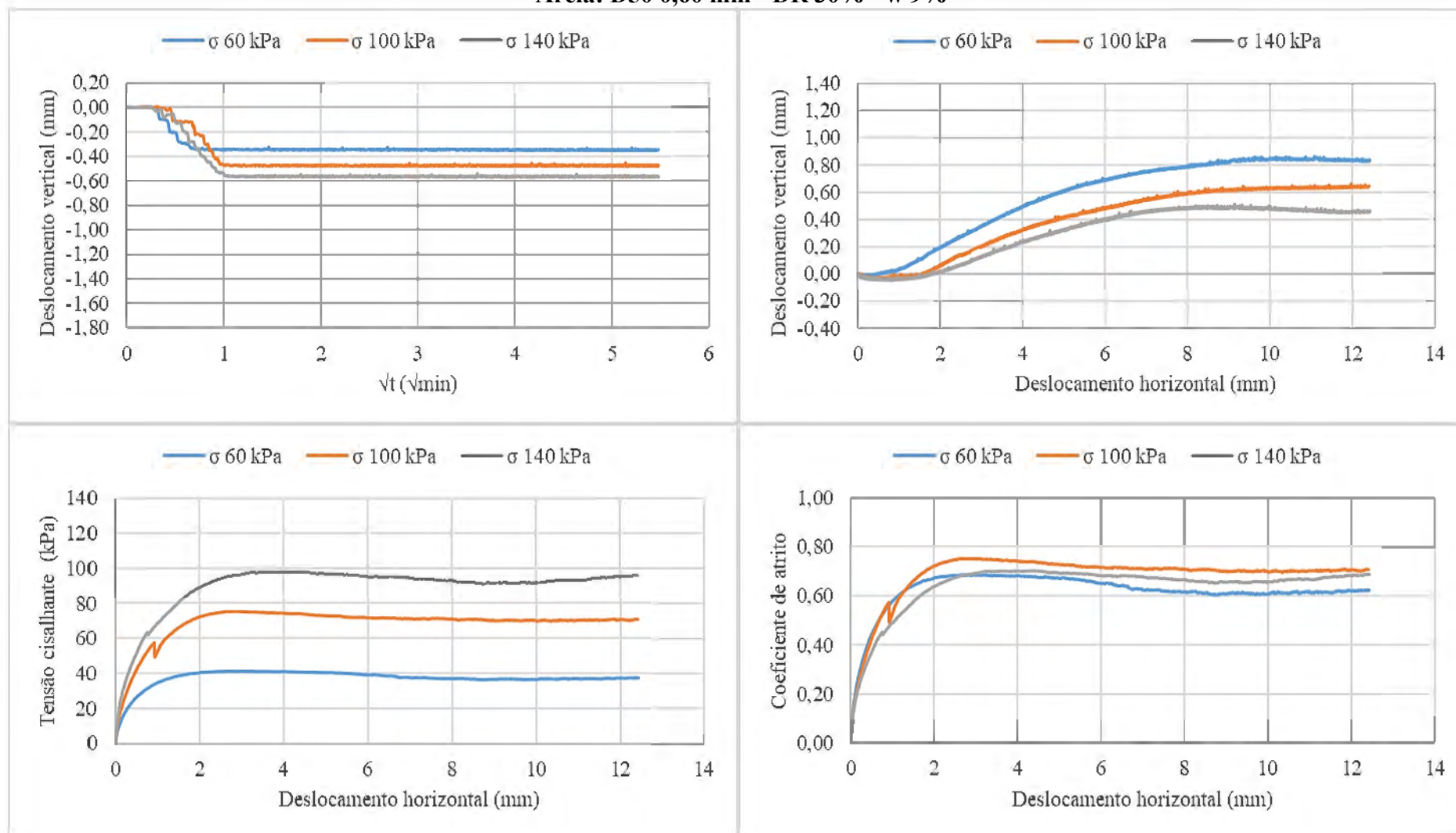
Interface: D50 1,10 mm - DR 50% - w 6% - t 24h



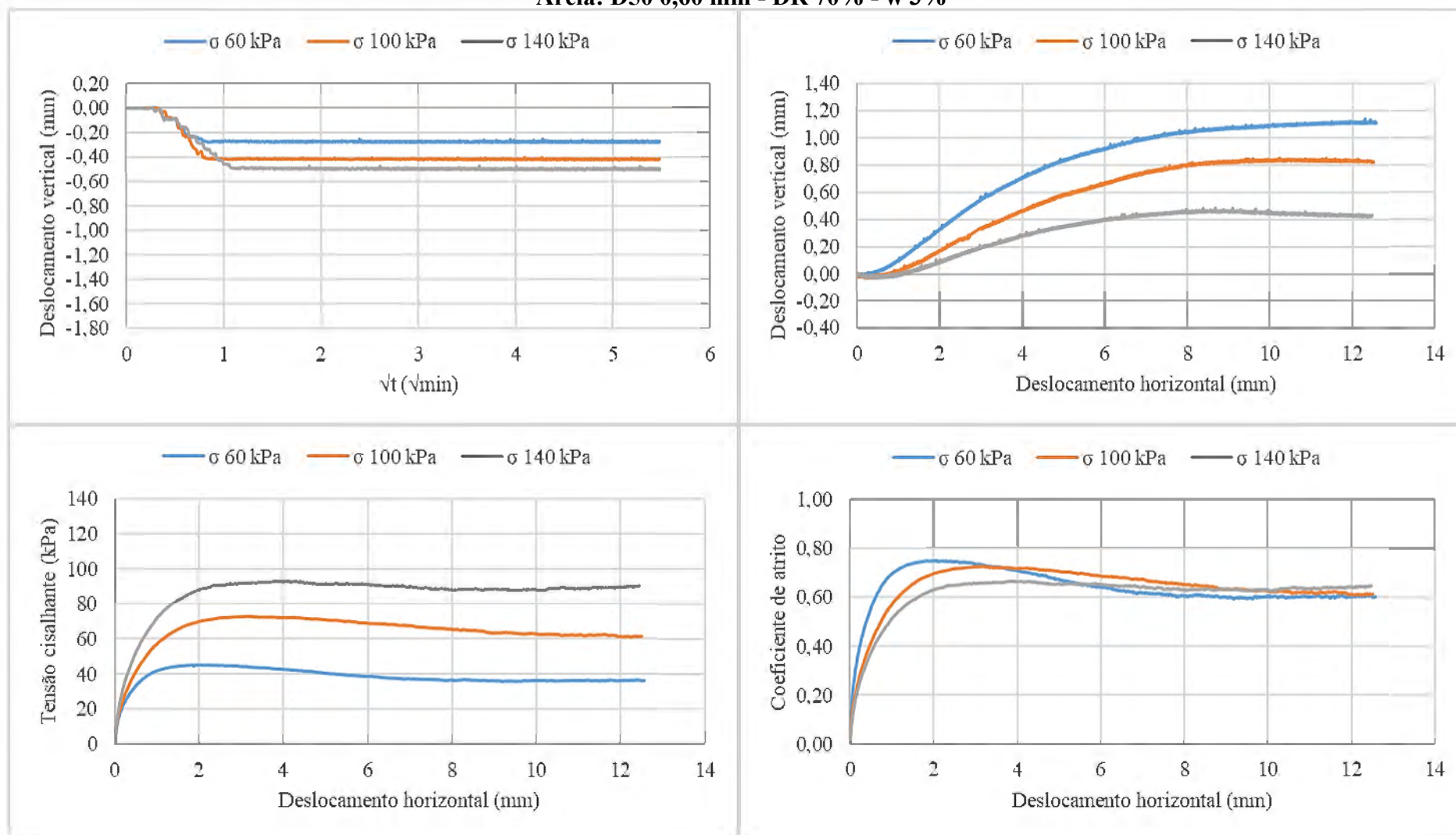
Areia: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3%



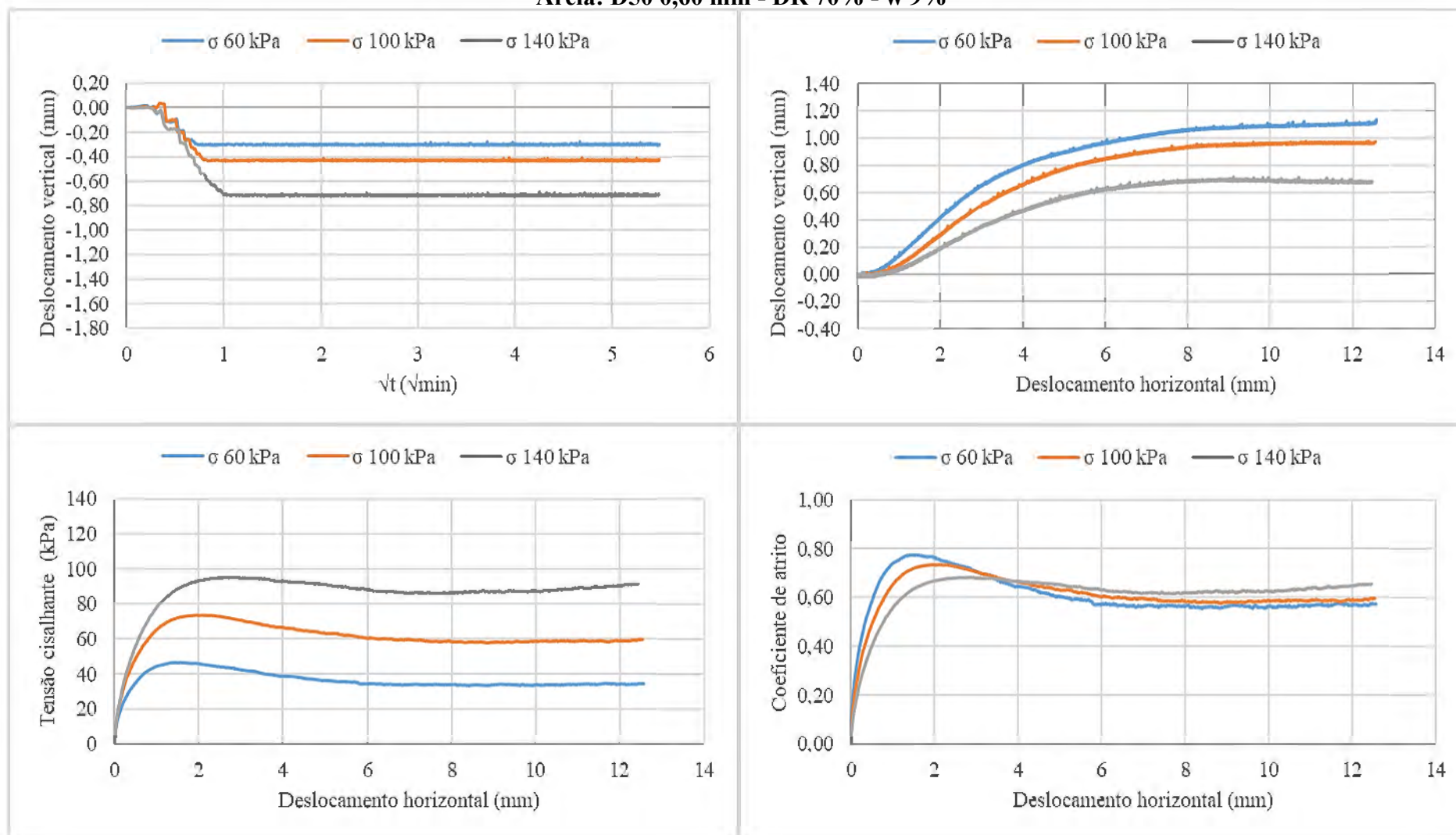
Areia: D50 0,60 mm - DR 30% - w 9%



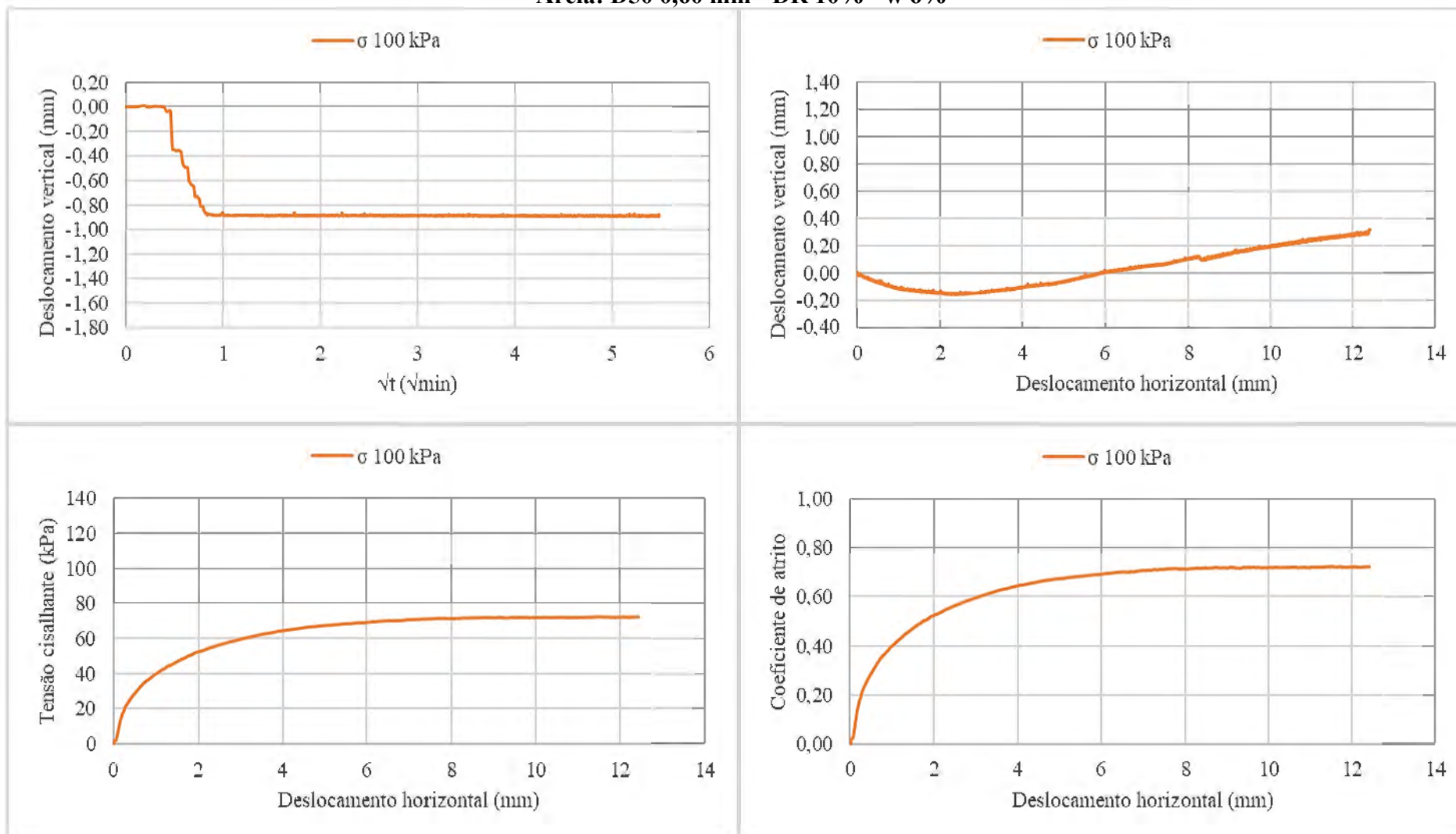
Areia: D50 0,60 mm - DR 70% - w 3%



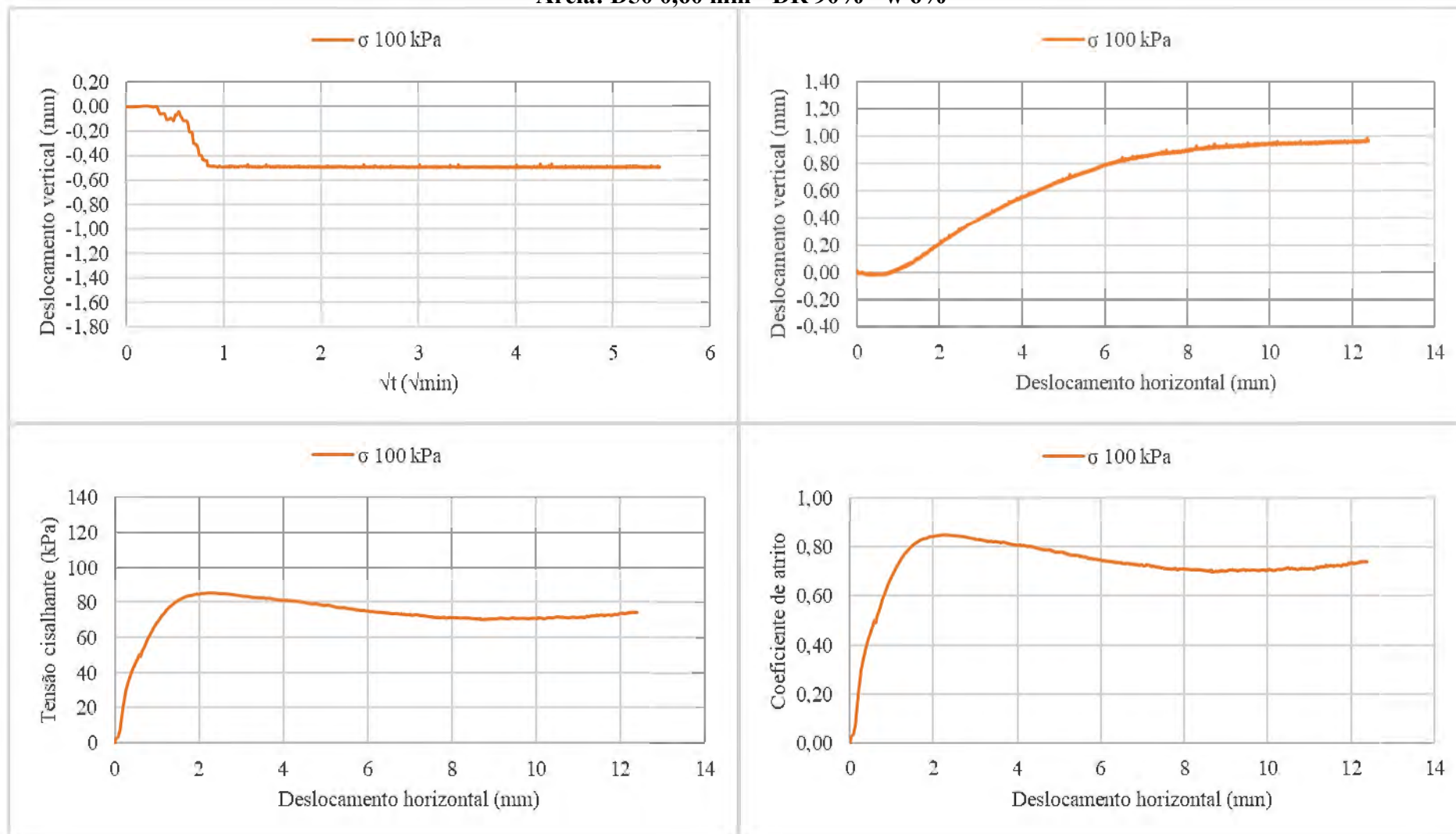
Areia: D50 0,60 mm - DR 70% - w 9%



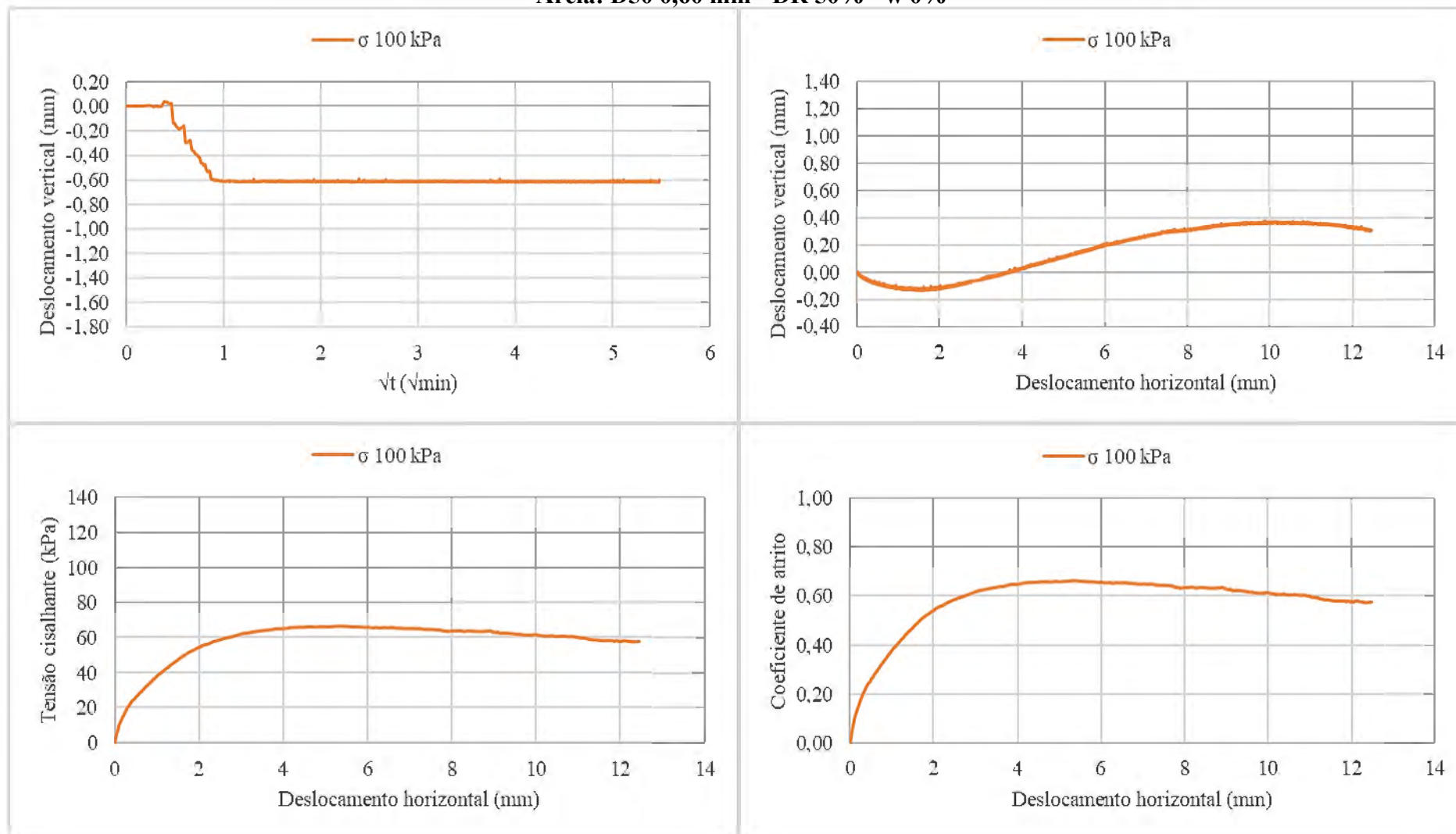
Areia: D50 0,60 mm - DR 10% - w 6%



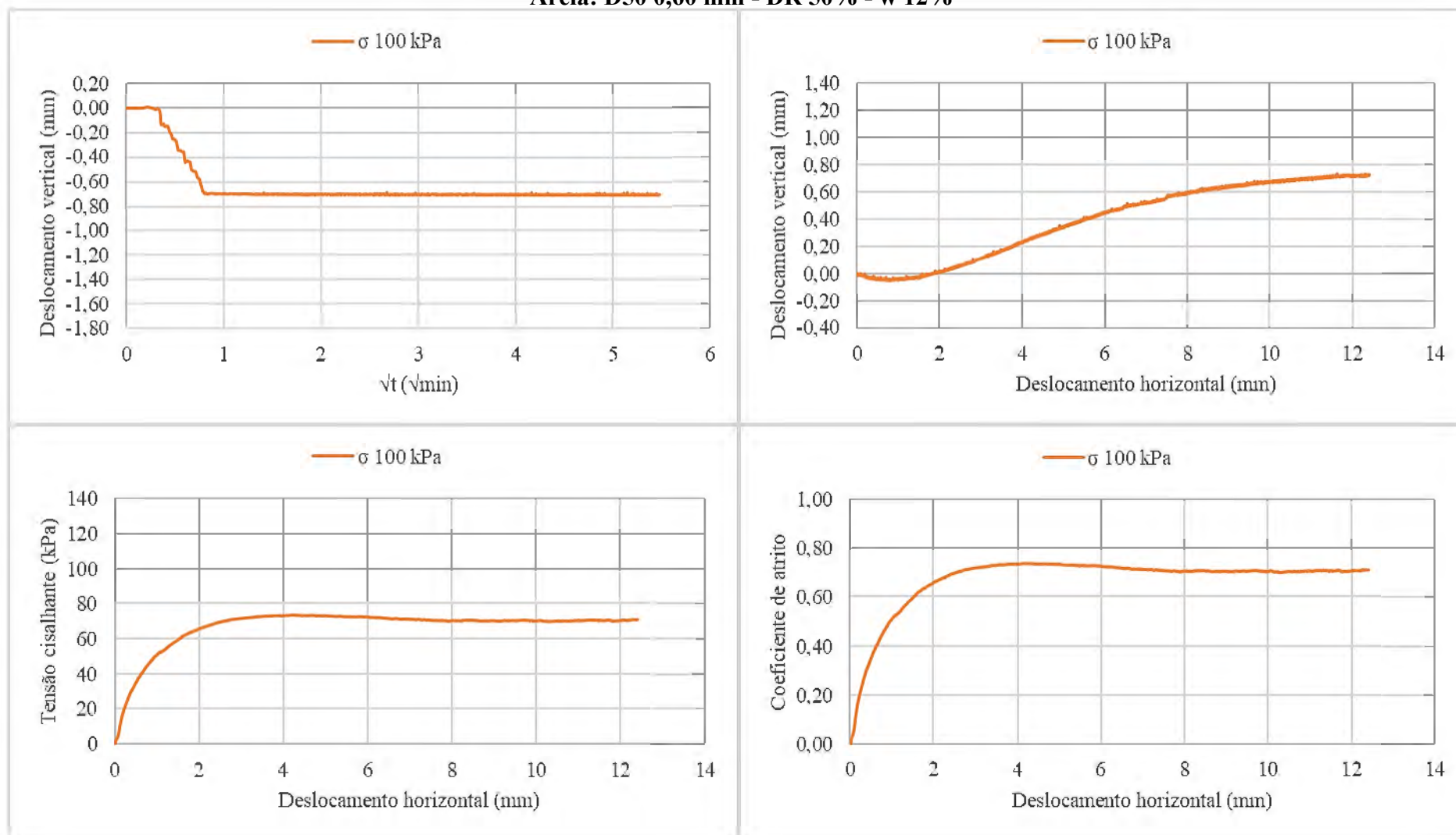
Areia: D50 0,60 mm - DR 90% - w 6%



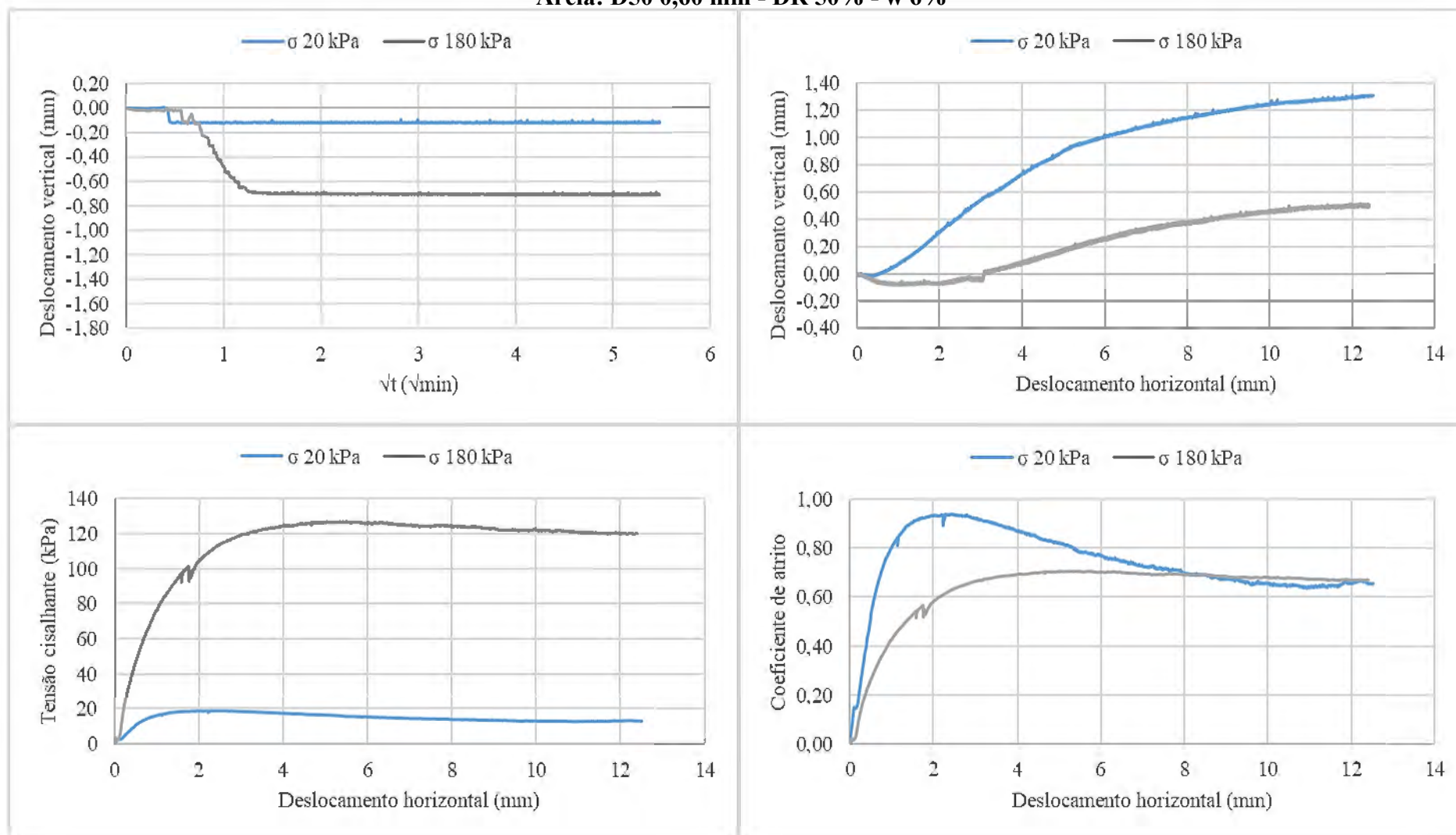
Areia: D50 0,60 mm - DR 50% - w 0%



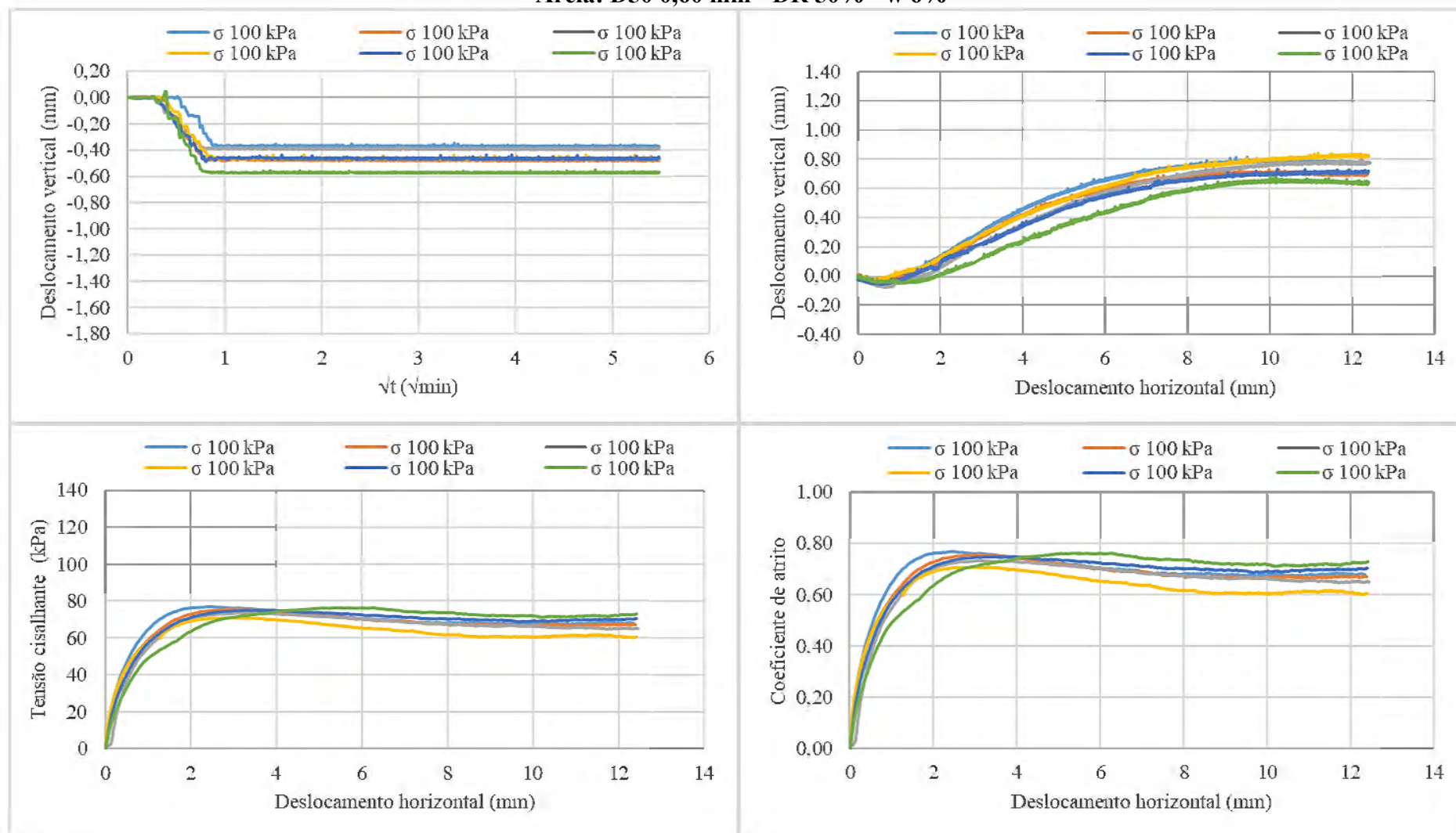
Areia: D50 0,60 mm - DR 50% - w 12%



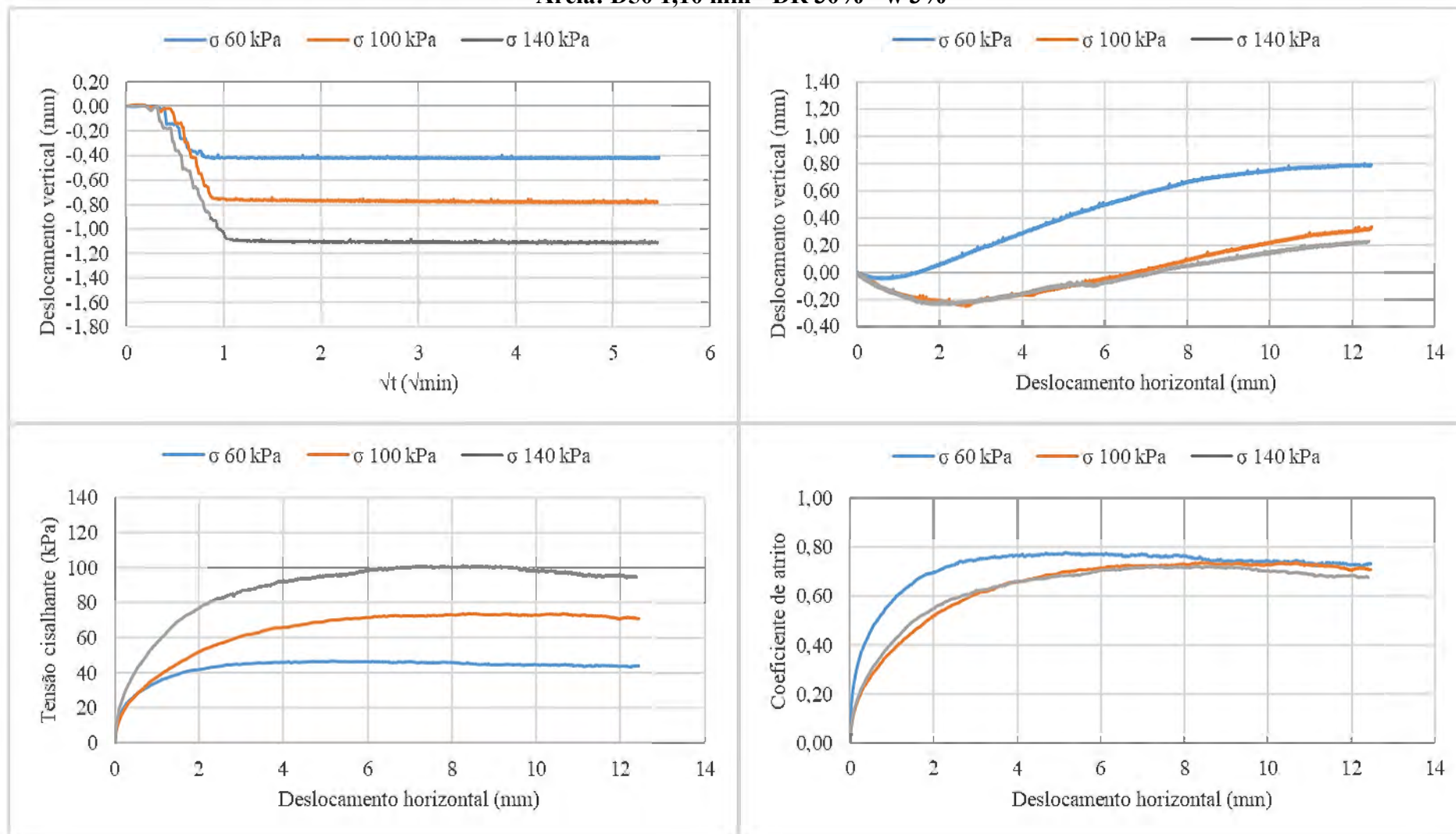
Areia: D50 0,60 mm - DR 50% - w 6%



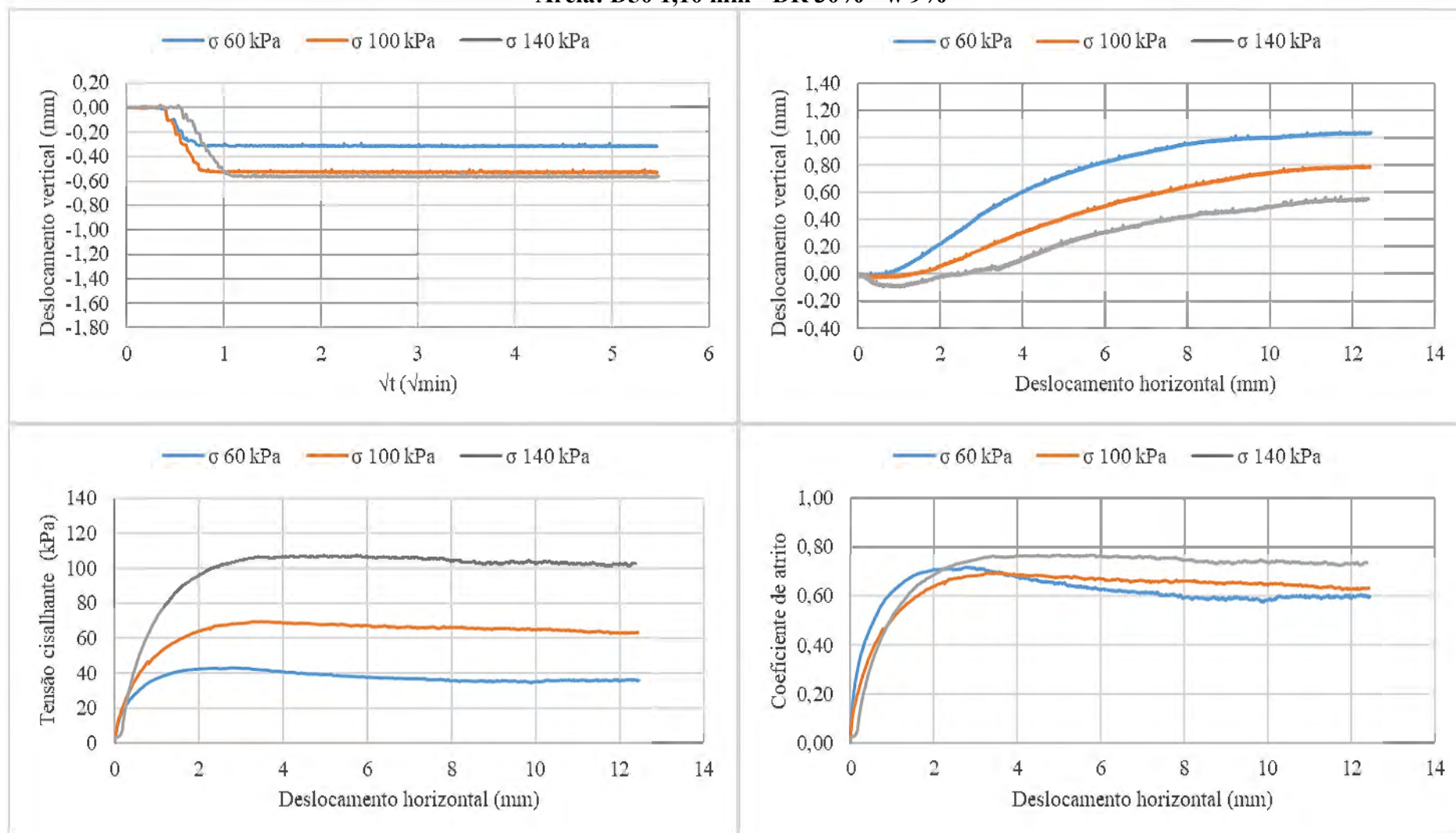
Areia: D50 0,60 mm - DR 50% - w 6%



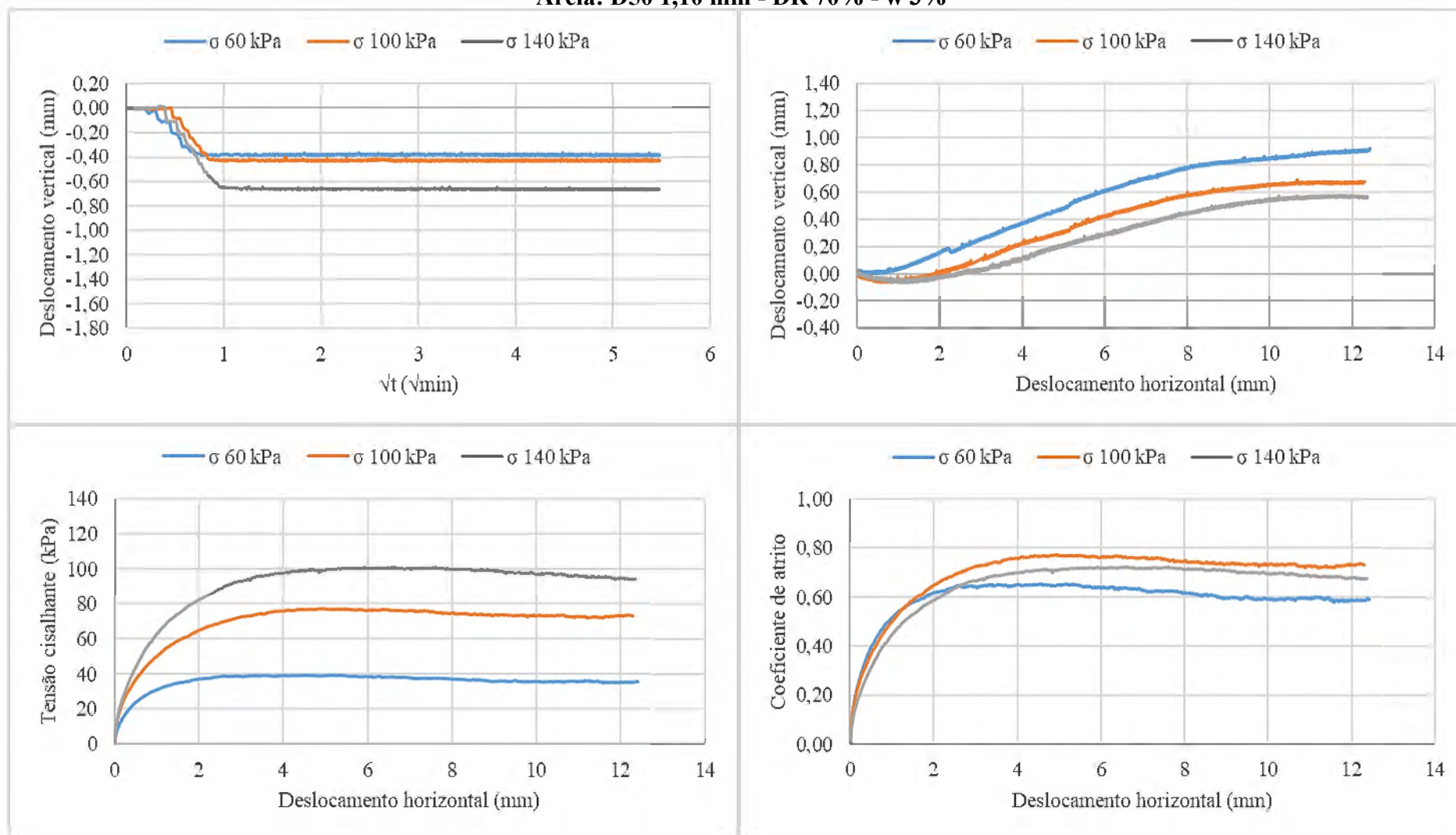
Areia: D50 1,10 mm - DR 30% - w 3%



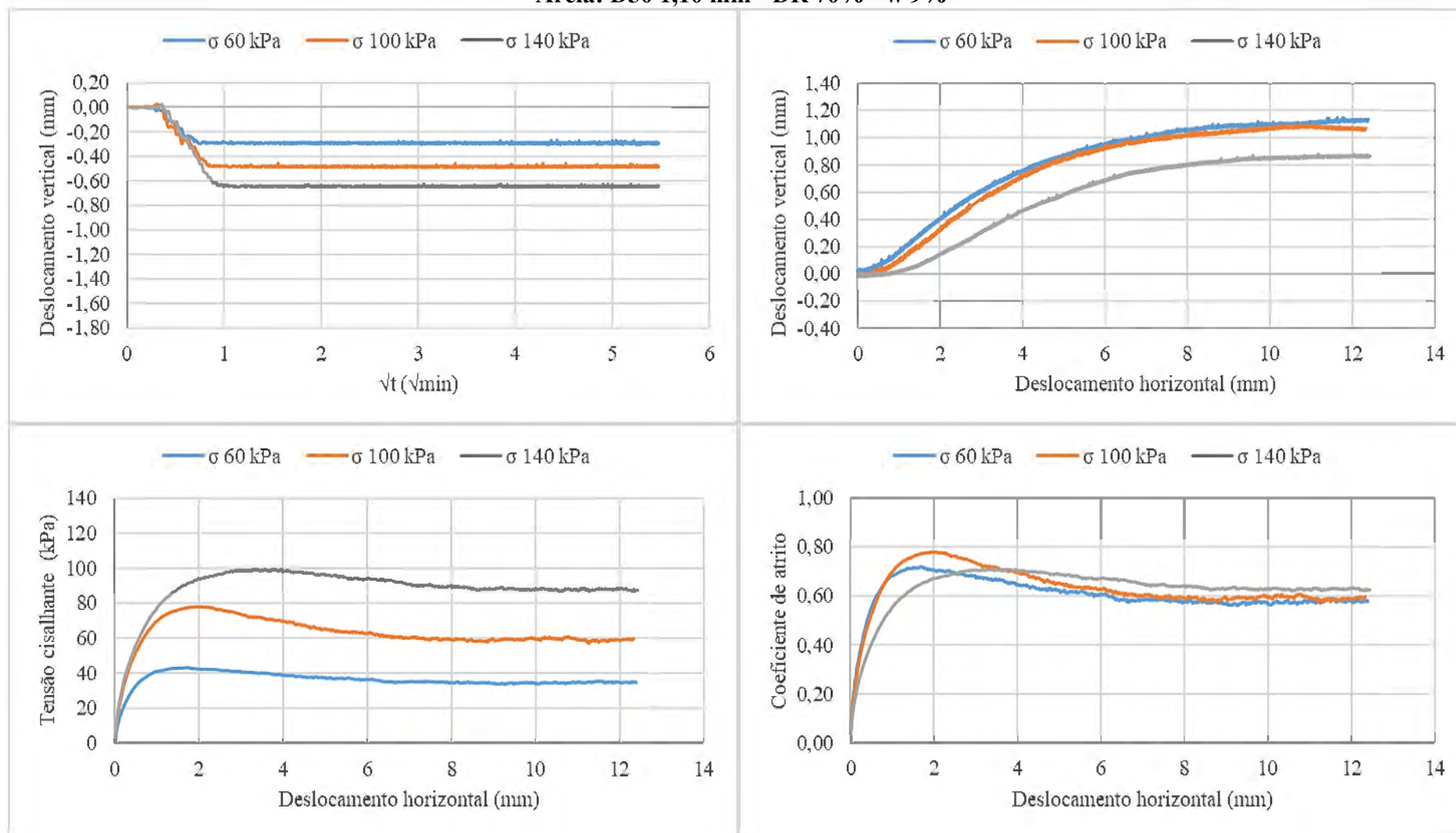
Areia: D50 1,10 mm - DR 30% - w 9%



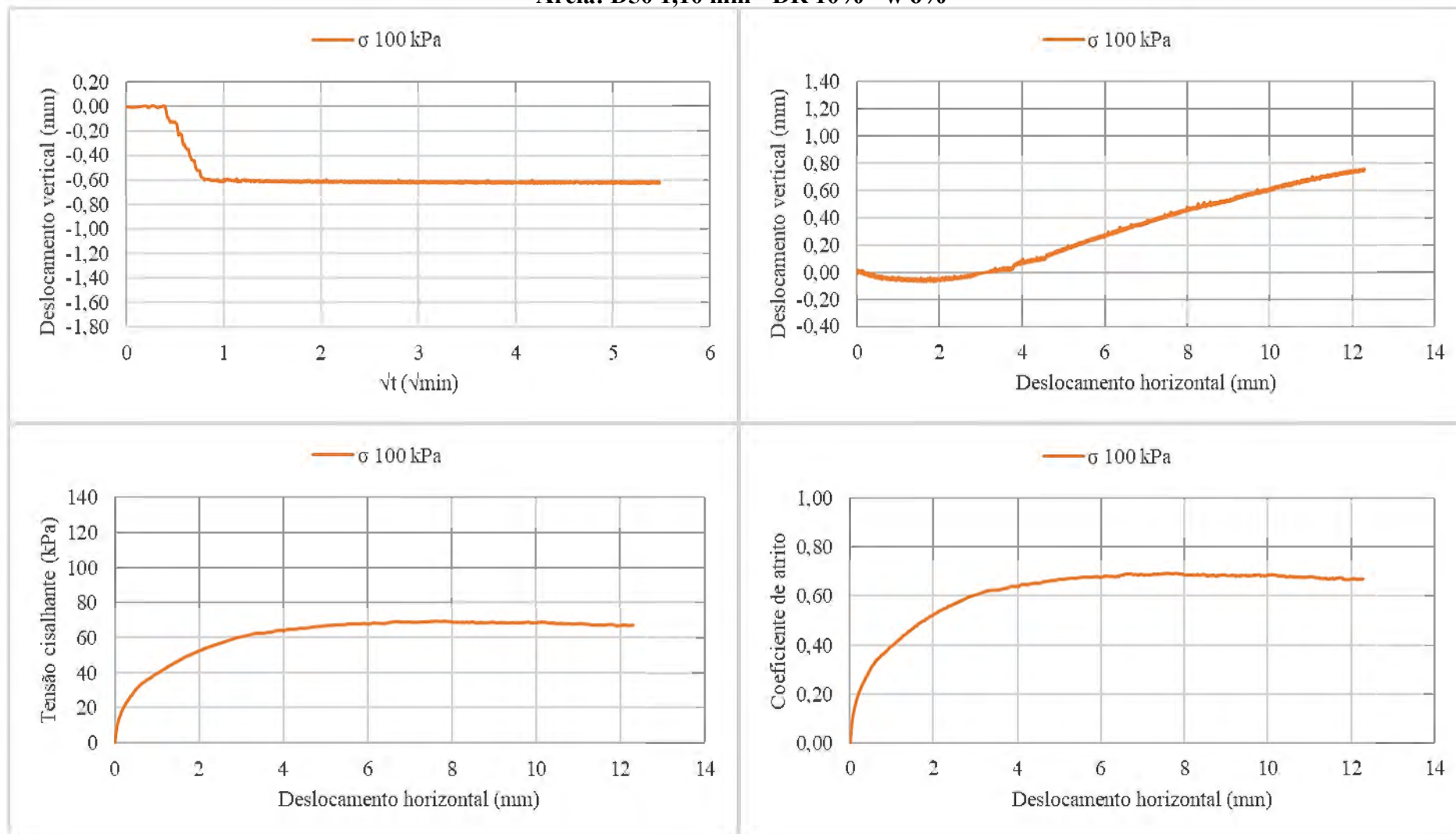
Areia: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3%



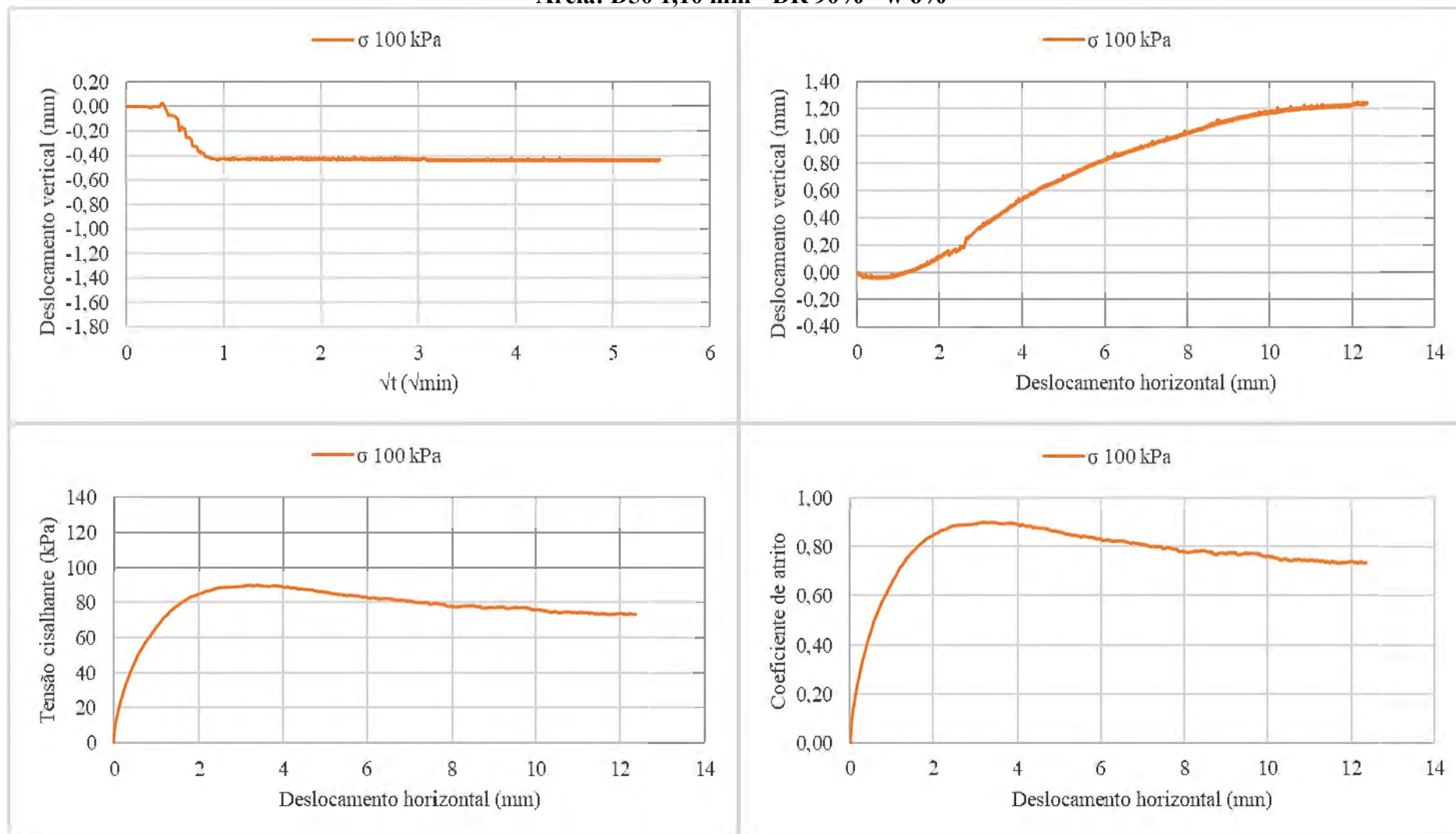
Areia: D50 1,10 mm - DR 70% - w 9%



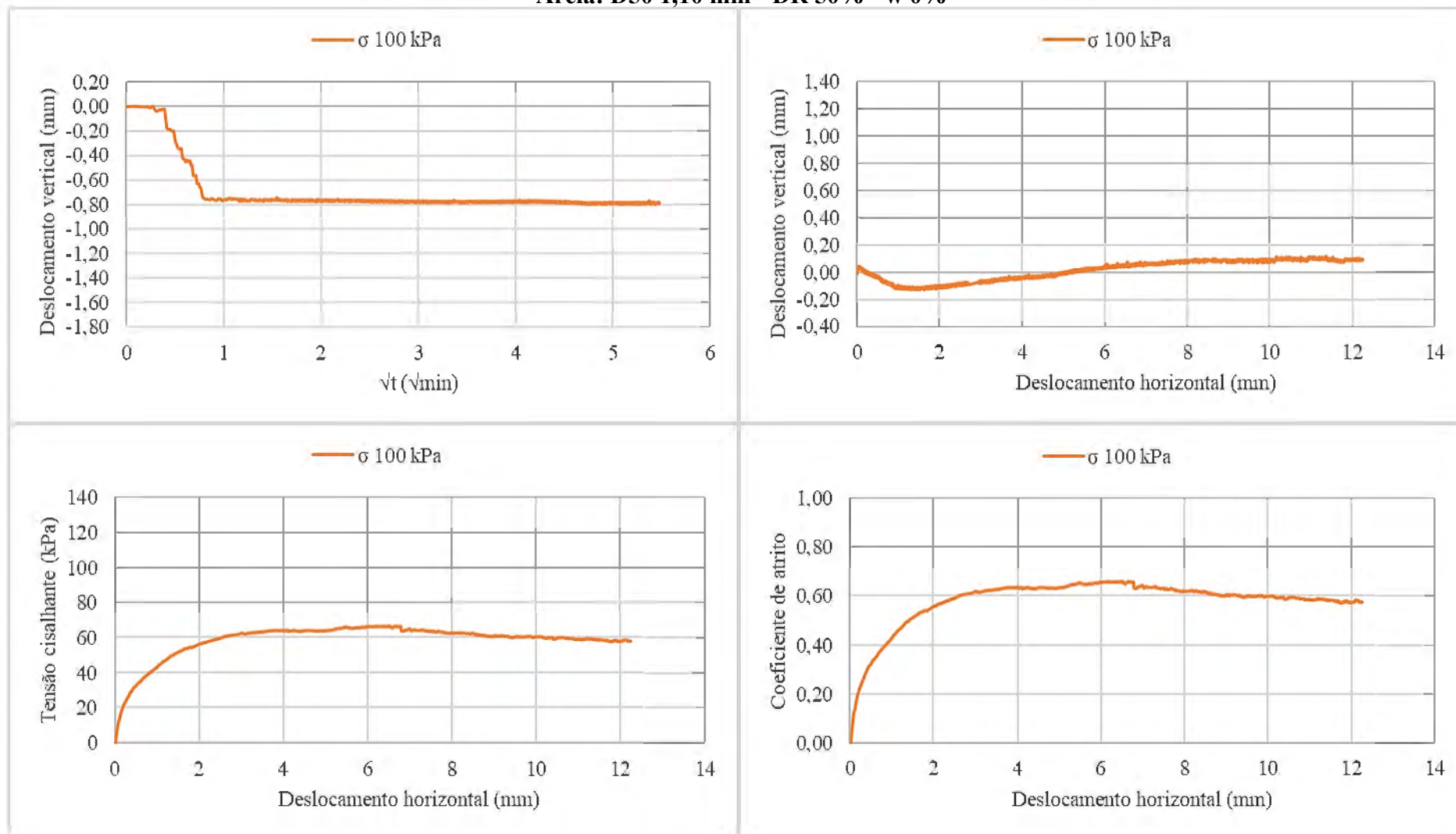
Areia: D50 1,10 mm - DR 10% - w 6%



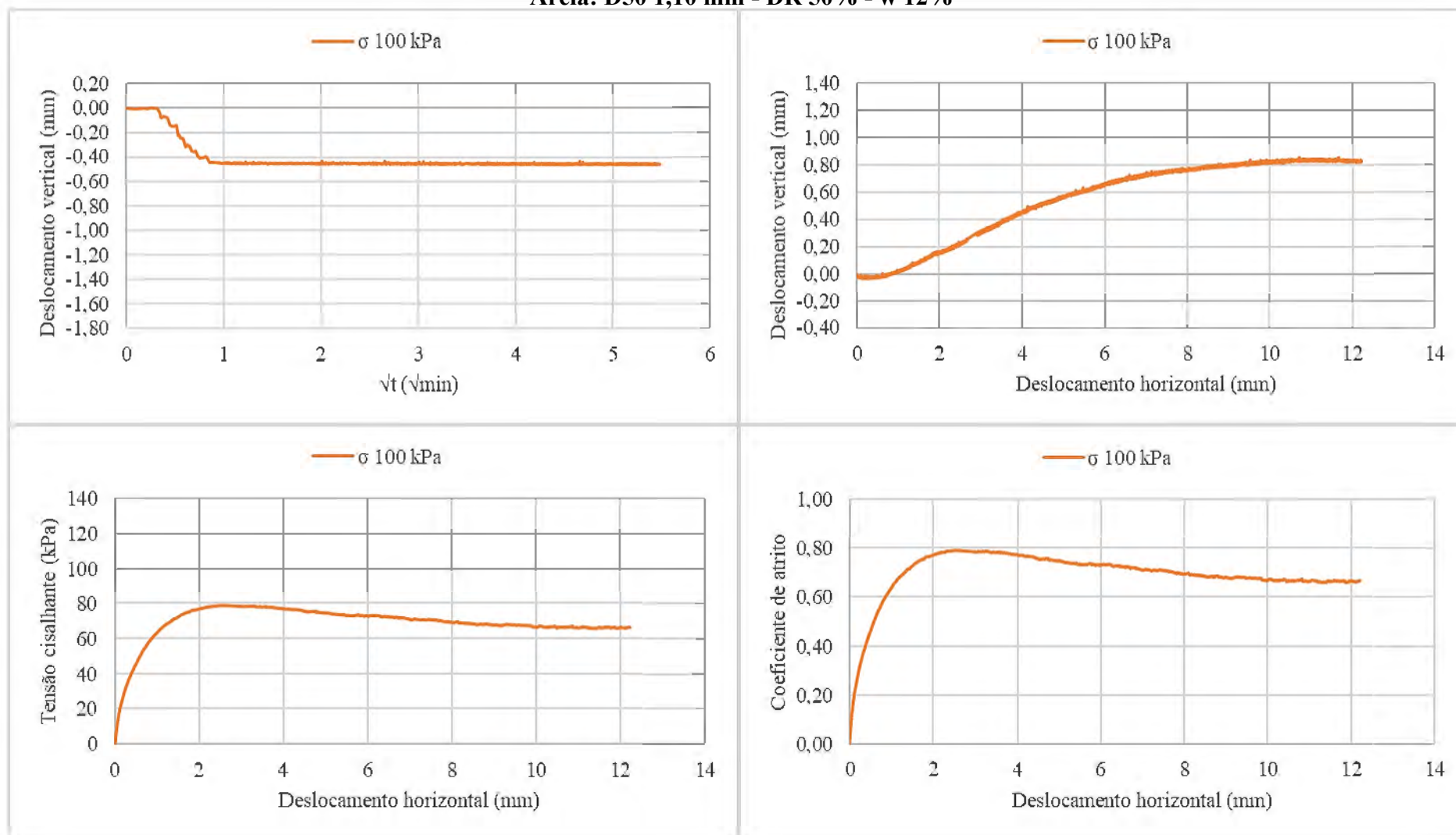
Areia: D50 1,10 mm - DR 90% - w 6%



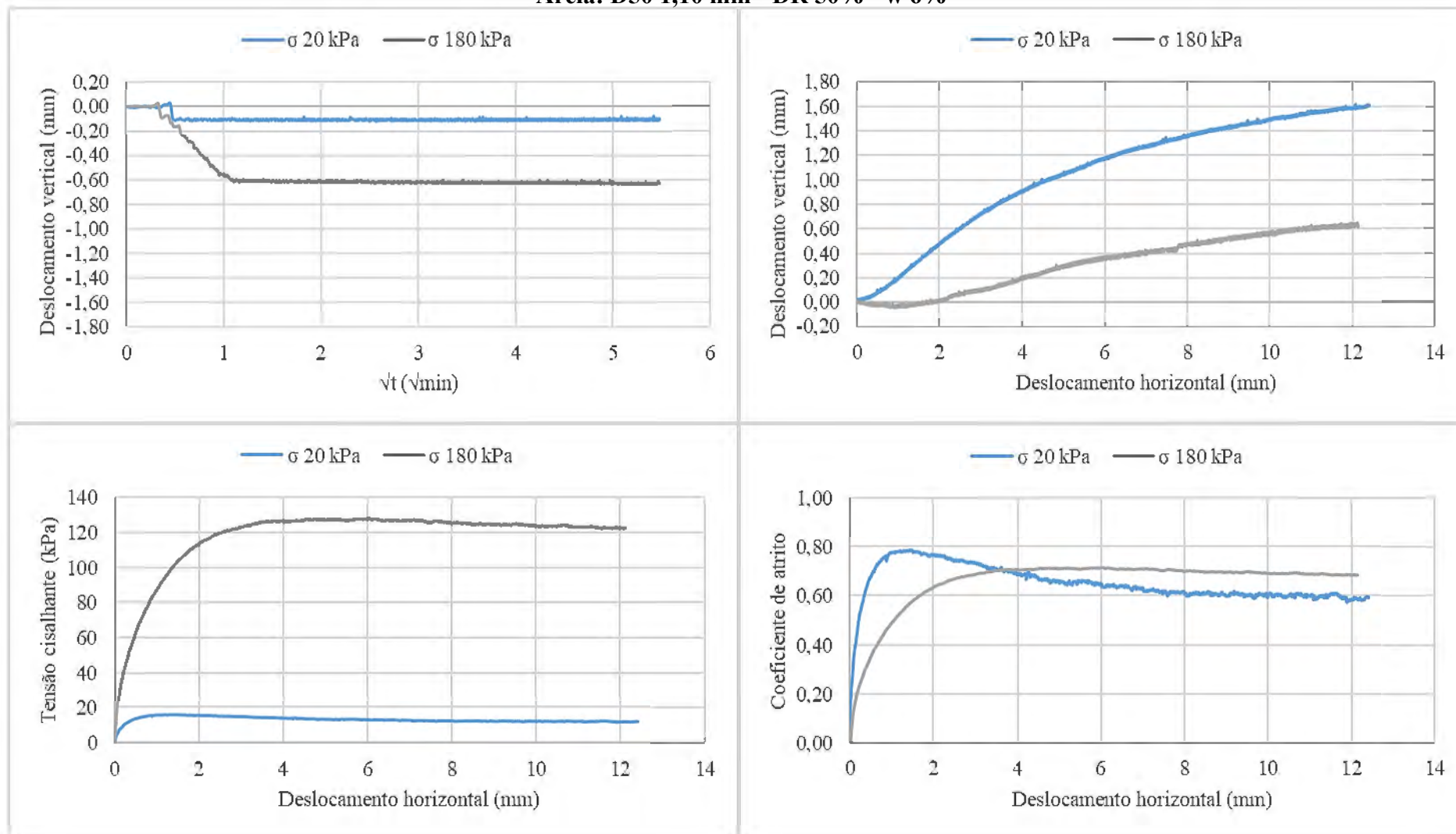
Areia: D50 1,10 mm - DR 50% - w 0%



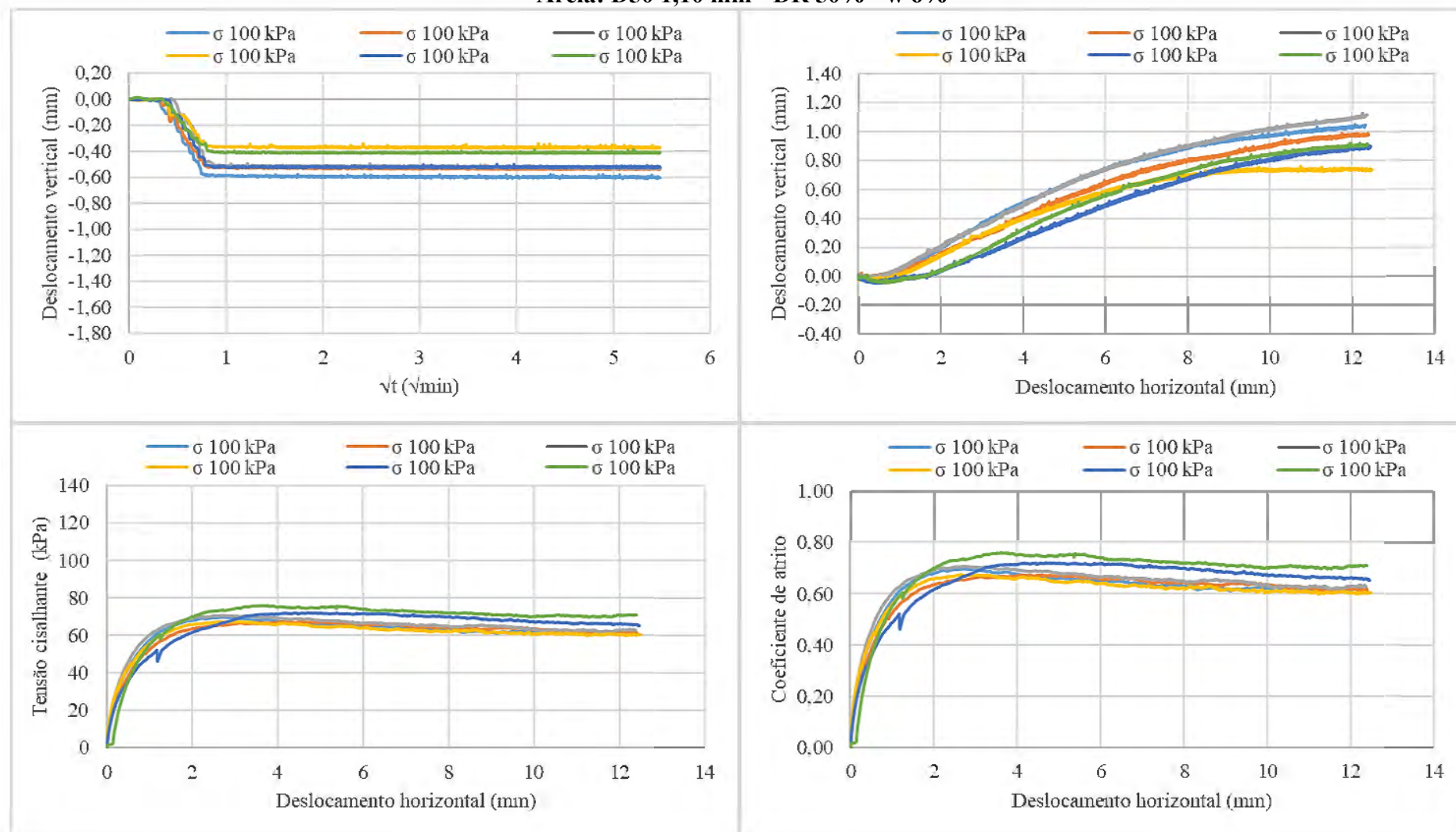
Areia: D50 1,10 mm - DR 50% - w 12%



Areia: D50 1,10 mm - DR 50% - w 6%



Areia: D50 1,10 mm - DR 50% - w 6%



APÊNDICE 2 - RESUMO DO CISALHAMENTO DIRETO

Interface: D50 0,60 mm - Densidade Relativa e Umidade

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	DR0 (%)	ΔDR (%)	w0 (%)	Δw (%)	wf (%)	wf-w0 (%)
0,60	30	3	6	60	34,68	4,68	2,87	-0,13	4,54	1,66
0,60	30	3	6	100	34,77	4,77	2,78	-0,22	5,94	3,16
0,60	30	3	6	140	32,94	2,94	2,87	-0,13	4,22	1,36
0,60	30	9	6	60	34,55	4,55	8,56	-0,44	8,62	0,06
0,60	30	9	6	100	36,52	6,52	8,10	-0,90	8,95	0,85
0,60	30	9	6	140	33,78	3,78	8,35	-0,65	8,81	0,46
0,60	70	3	6	60	75,90	5,90	2,53	-0,47	4,56	2,03
0,60	70	3	6	100	72,68	2,68	2,92	-0,08	5,00	2,08
0,60	70	3	6	140	75,84	5,84	2,59	-0,41	4,60	2,01
0,60	70	9	6	60	72,11	2,11	8,45	-0,55	9,35	0,90
0,60	70	9	6	100	70,09	0,09	8,67	-0,33	9,07	0,40
0,60	70	9	6	140	69,58	-0,42	8,77	-0,23	8,88	0,11
0,60	30	3	18	60	35,02	5,02	2,77	-0,23	3,11	0,35
0,60	30	3	18	100	33,23	3,23	2,73	-0,27	3,11	0,39
0,60	30	3	18	140	35,56	5,56	2,83	-0,17	3,53	0,70
0,60	30	9	18	60	35,71	5,71	8,26	-0,74	8,73	0,47
0,60	30	9	18	100	33,61	3,61	8,61	-0,39	8,79	0,19
0,60	30	9	18	140	31,99	1,99	8,74	-0,26	9,10	0,36
0,60	70	3	18	60	73,30	3,30	2,70	-0,30	3,40	0,70
0,60	70	3	18	100	73,17	3,17	2,63	-0,37	3,52	0,88
0,60	70	3	18	140	73,21	3,21	2,68	-0,32	3,58	0,90
0,60	70	9	18	60	71,77	1,77	8,45	-0,55	9,24	0,79
0,60	70	9	18	100	67,78	-2,22	8,93	-0,07	8,38	-0,55
0,60	70	9	18	140	76,53	6,53	8,01	-0,99	8,43	0,43
0,60	10	6	12	100	20,24	10,24	5,57	-0,43	6,95	1,38
0,60	90	6	12	100	89,66	-0,34	5,79	-0,21	6,86	1,07
0,60	50	0	12	100	55,51	5,51	0,02	0,02	2,40	2,38
0,60	50	12	12	100	49,40	-0,60	11,82	-0,18	12,19	0,38
0,60	50	6	0	100	53,94	3,94	5,54	-0,46	6,32	0,78
0,60	50	6	24	100	53,39	3,39	5,54	-0,46	6,90	1,36
0,60	50	6	12	20	49,98	-0,02	6,19	0,19	7,44	1,25
0,60	50	6	12	180	55,59	5,59	5,43	-0,57	6,74	1,31
0,60	50	6	12	100	52,50	2,50	5,93	-0,07	6,93	1,01
0,60	50	6	12	100	54,03	4,03	5,60	-0,40	6,78	1,18
0,60	50	6	12	100	54,33	4,33	5,46	-0,54	6,36	0,90
0,60	50	6	12	100	57,23	7,23	5,42	-0,58	6,73	1,32
0,60	50	6	12	100	51,31	1,31	5,99	-0,01	7,74	1,75
0,60	50	6	12	100	52,65	2,65	5,89	-0,11	7,41	1,51

Interface: D50 1,10 mm - Densidade Relativa e Umidade

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	DR0 (%)	ΔDR (%)	w0 (%)	Δw (%)	wf (%)	wf-w0 (%)
1,10	30	3	6	60	43,57	13,57	2,65	-0,35	4,13	1,48
1,10	30	3	6	100	45,87	15,87	2,64	-0,36	4,40	1,76
1,10	30	3	6	140	42,45	12,45	2,70	-0,30	4,10	1,40
1,10	30	9	6	60	40,29	10,29	8,37	-0,63	7,99	-0,37
1,10	30	9	6	100	36,30	6,30	8,93	-0,07	9,46	0,52
1,10	30	9	6	140	39,31	9,31	8,66	-0,34	9,50	0,85
1,10	70	3	6	60	85,73	15,73	2,65	-0,35	4,06	1,41
1,10	70	3	6	100	82,12	12,12	2,71	-0,29	4,21	1,50
1,10	70	3	6	140	78,60	8,60	2,82	-0,18	3,97	1,15
1,10	70	9	6	60	88,56	18,56	7,91	-1,09	7,07	-0,84
1,10	70	9	6	100	67,42	-2,58	9,09	0,09	8,45	-0,64
1,10	70	9	6	140	79,32	9,32	8,64	-0,36	9,28	0,65
1,10	30	3	18	60	48,22	18,22	2,34	-0,66	2,78	0,44
1,10	30	3	18	100	39,76	9,76	3,08	0,08	3,86	0,78
1,10	30	3	18	140	49,19	19,19	2,34	-0,66	3,58	1,24
1,10	30	9	18	60	44,90	14,90	8,29	-0,71	8,17	-0,11
1,10	30	9	18	100	40,21	10,21	8,75	-0,25	8,49	-0,25
1,10	30	9	18	140	38,58	8,58	8,75	-0,25	8,47	-0,27
1,10	70	3	18	60	83,83	13,83	2,61	-0,39	3,62	1,00
1,10	70	3	18	100	84,15	14,15	2,72	-0,28	3,56	0,84
1,10	70	3	18	140	82,52	12,52	2,58	-0,42	2,95	0,38
1,10	70	9	18	60	78,22	8,22	8,43	-0,57	7,85	-0,59
1,10	70	9	18	100	80,44	10,44	8,52	-0,48	8,52	0,01
1,10	70	9	18	140	80,47	10,47	8,30	-0,70	8,87	0,57
1,10	10	6	12	100	29,64	19,64	5,65	-0,35	5,62	-0,04
1,10	90	6	12	100	95,50	5,50	6,05	0,05	6,10	0,05
1,10	50	0	12	100	65,01	15,01	0,05	0,05	2,45	2,41
1,10	50	12	12	100	63,57	13,57	11,09	-0,91	11,62	0,53
1,10	50	6	0	100	59,70	9,70	5,62	-0,38	6,49	0,86
1,10	50	6	24	100	60,46	10,46	5,83	-0,17	5,05	-0,77
1,10	50	6	12	20	62,49	12,49	5,81	-0,19	6,39	0,59
1,10	50	6	12	180	63,49	13,49	5,44	-0,56	6,00	0,56
1,10	50	6	12	100	57,43	7,43	5,98	-0,02	6,22	0,24
1,10	50	6	12	100	62,31	12,31	5,46	-0,54	6,73	1,27
1,10	50	6	12	100	57,80	7,80	5,89	-0,11	6,78	0,89
1,10	50	6	12	100	63,86	13,86	5,57	-0,43	5,84	0,27
1,10	50	6	12	100	58,27	8,27	6,09	0,09	7,28	1,18
1,10	50	6	12	100	61,63	11,63	5,72	-0,28	6,25	0,53

Areia: D50 0,60 mm - Densidade Relativa e Umidade

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	S (kPa)	DR0 (%)	ΔDR (%)	w0 (%)	Δw (%)	wf (%)	wf-w0 (%)
0,60	30	3	60	18,48	-11,52	2,49	-0,51	2,32	-0,18
0,60	30	3	100	14,55	-15,45	2,59	-0,41	2,35	-0,24
0,60	30	3	140	19,06	-10,94	2,58	-0,42	2,50	-0,09
0,60	30	9	60	20,58	-9,42	7,99	-1,01	7,65	-0,34
0,60	30	9	100	18,19	-11,81	8,09	-0,91	7,41	-0,67
0,60	30	9	140	23,39	-6,61	7,84	-1,16	7,41	-0,43
0,60	70	3	60	56,80	-13,20	2,67	-0,33	2,45	-0,22
0,60	70	3	100	56,70	-13,30	2,54	-0,46	2,47	-0,07
0,60	70	3	140	58,30	-11,70	2,10	-0,90	1,74	-0,36
0,60	70	9	60	57,57	-12,43	8,09	-0,91	7,46	-0,63
0,60	70	9	100	55,33	-14,67	8,61	-0,39	7,82	-0,79
0,60	70	9	140	58,32	-11,68	8,29	-0,71	8,24	-0,05
0,60	10	6	100	0,86	-9,14	5,57	-0,43	5,80	0,23
0,60	90	6	100	76,06	-13,94	5,68	-0,32	5,22	-0,46
0,60	50	0	100	37,59	-12,41	0,04	0,04	0,13	0,09
0,60	50	12	100	38,40	-11,60	11,30	-0,70	10,50	-0,81
0,60	50	6	20	34,08	-15,92	5,72	-0,28	5,83	0,11
0,60	50	6	180	36,76	-13,24	5,59	-0,41	5,12	-0,47
0,60	50	6	100	33,30	-16,70	5,80	-0,20	5,60	-0,20
0,60	50	6	100	35,07	-14,93	5,62	-0,38	5,44	-0,18
0,60	50	6	100	37,33	-12,67	5,53	-0,47	5,31	-0,22
0,60	50	6	100	31,69	-18,31	5,68	-0,32	5,67	0,00
0,60	50	6	100	32,65	-17,35	5,87	-0,13	5,44	-0,42
0,60	50	6	100	42,61	-7,39	5,27	-0,73	5,31	0,05

Interface: D50 1,10 mm - Densidade Relativa e Umidade

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	S (kPa)	DR0 (%)	ΔDR (%)	w0 (%)	Δw (%)	wf (%)	wf-w0 (%)
1,10	30	3	60	21,95	-8,05	2,65	-0,35	2,47	-0,18
1,10	30	3	100	11,64	-18,36	2,73	-0,27	2,62	-0,10
1,10	30	3	140	13,40	-16,60	2,62	-0,38	2,50	-0,11
1,10	30	9	60	14,68	-15,32	8,41	-0,59	8,04	-0,36
1,10	30	9	100	11,85	-18,15	8,45	-0,55	8,34	-0,11
1,10	30	9	140	13,71	-16,29	8,33	-0,67	9,32	0,99
1,10	70	3	60	53,17	-16,83	2,76	-0,24	2,52	-0,24
1,10	70	3	100	62,03	-7,97	2,47	-0,53	2,32	-0,15
1,10	70	3	140	49,32	-20,68	2,73	-0,27	2,54	-0,19
1,10	70	9	60	55,02	-14,98	8,23	-0,77	8,34	0,11
1,10	70	9	100	57,34	-12,66	8,07	-0,93	8,11	0,04
1,10	70	9	140	61,78	-8,22	7,49	-1,51	7,01	-0,48
1,10	10	6	100	-5,58	-15,58	5,70	-0,30	5,41	-0,29
1,10	90	6	100	71,21	-18,79	5,60	-0,40	5,72	0,12
1,10	50	0	100	36,21	-13,79	0,05	0,05	0,11	0,06
1,10	50	12	100	36,21	-13,79	11,07	-0,93	11,16	0,09
1,10	50	6	20	57,61	7,61	4,01	-1,99	5,48	1,47
1,10	50	6	180	45,62	-4,38	5,08	-0,92	5,07	-0,01
1,10	50	6	100	44,48	-5,52	5,15	-0,85	4,82	-0,33
1,10	50	6	100	40,40	-9,60	5,70	-0,30	5,12	-0,58
1,10	50	6	100	34,25	-15,75	5,69	-0,31	5,51	-0,18
1,10	50	6	100	29,46	-20,54	5,58	-0,42	4,92	-0,66
1,10	50	6	100	41,65	-8,35	5,34	-0,66	5,17	-0,17
1,10	50	6	100	37,28	-12,72	5,49	-0,51	5,22	-0,27

Interface: D50 0,60 mm - Tensões Cisalhantes e Deslocamentos

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	τ_p (kPa)	τ_{pp} (kPa)	$(\tau/\sigma)_p$	$(\tau/\sigma)_{pp}$	dp (mm)	dpp (mm)
0,60	30	3	6	60	45,46	41,10	0,76	0,68	4,14	10,54
0,60	30	3	6	100	66,90	66,77	0,67	0,67	12,16	12,17
0,60	30	3	6	140	94,36	90,61	0,67	0,65	5,82	12,37
0,60	30	9	6	60	47,48	42,20	0,79	0,70	3,26	9,02
0,60	30	9	6	100	70,12	63,68	0,70	0,64	3,68	12,05
0,60	30	9	6	140	98,08	85,54	0,70	0,61	4,40	12,25
0,60	70	3	6	60	46,97	37,48	0,78	0,62	1,90	10,90
0,60	70	3	6	100	68,32	62,91	0,68	0,63	5,88	11,71
0,60	70	3	6	140	98,39	93,11	0,70	0,67	5,92	12,24
0,60	70	9	6	60	48,95	40,85	0,82	0,68	1,93	12,01
0,60	70	9	6	100	73,16	65,14	0,73	0,65	3,05	8,98
0,60	70	9	6	140	97,32	85,95	0,70	0,61	4,91	12,27
0,60	30	3	18	60	45,30	41,34	0,75	0,69	2,67	6,47
0,60	30	3	18	100	70,62	60,87	0,71	0,61	2,10	11,28
0,60	30	3	18	140	97,12	93,88	0,69	0,67	4,11	10,95
0,60	30	9	18	60	42,35	38,22	0,71	0,64	1,26	10,79
0,60	30	9	18	100	67,86	65,78	0,68	0,66	8,41	11,90
0,60	30	9	18	140	91,65	85,23	0,65	0,61	4,76	12,39
0,60	70	3	18	60	46,50	41,04	0,78	0,68	2,26	9,76
0,60	70	3	18	100	75,72	67,63	0,76	0,68	3,69	11,84
0,60	70	3	18	140	101,95	94,55	0,73	0,68	4,68	10,32
0,60	70	9	18	60	46,45	41,11	0,77	0,69	2,52	9,06
0,60	70	9	18	100	72,63	64,66	0,73	0,65	2,79	10,96
0,60	70	9	18	140	104,52	90,58	0,75	0,65	3,02	10,04
0,60	10	6	12	100	62,03	59,52	0,62	0,60	6,83	8,52
0,60	90	6	12	100	74,31	66,96	0,74	0,67	1,48	12,38
0,60	50	0	12	100	70,46	65,11	0,70	0,65	2,57	6,37
0,60	50	12	12	100	73,89	62,06	0,74	0,62	4,53	11,89
0,60	50	6	0	100	68,77	65,03	0,69	0,65	7,49	11,99
0,60	50	6	24	100	70,80	60,00	0,71	0,60	3,04	10,55
0,60	50	6	12	20	16,86	13,69	0,84	0,68	1,96	10,69
0,60	50	6	12	180	114,57	108,23	0,64	0,60	4,65	11,25
0,60	50	6	12	100	66,56	64,26	0,67	0,64	10,02	10,49
0,60	50	6	12	100	72,73	62,11	0,73	0,62	1,07	12,16
0,60	50	6	12	100	74,93	67,36	0,75	0,67	5,27	12,08
0,60	50	6	12	100	69,32	62,73	0,69	0,63	4,18	12,29
0,60	50	6	12	100	66,21	58,69	0,66	0,59	4,85	12,24
0,60	50	6	12	100	68,09	62,76	0,68	0,63	7,78	12,16

Interface: D50 1,10 mm - Tensões Cisalhantes e Deslocamentos

D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	τ_p (kPa)	τ_{pp} (kPa)	$(\tau/\sigma)_p$	$(\tau/\sigma)_{pp}$	dp (mm)	dpp (mm)
1,10	30	3	6	60	49,41	41,58	0,82	0,69	2,59	12,13
1,10	30	3	6	100	79,40	67,18	0,79	0,67	2,11	11,99
1,10	30	3	6	140	106,31	99,45	0,76	0,71	3,11	11,55
1,10	30	9	6	60	45,77	40,56	0,76	0,68	6,22	11,56
1,10	30	9	6	100	74,57	66,88	0,75	0,67	3,08	9,21
1,10	30	9	6	140	96,90	89,19	0,69	0,64	5,27	11,70
1,10	70	3	6	60	46,93	42,46	0,78	0,71	2,77	11,12
1,10	70	3	6	100	73,91	65,96	0,74	0,66	3,88	11,36
1,10	70	3	6	140	97,51	91,55	0,70	0,65	4,42	11,27
1,10	70	9	6	60	43,92	40,47	0,73	0,67	3,65	12,20
1,10	70	9	6	100	74,83	64,19	0,75	0,64	3,53	11,86
1,10	70	9	6	140	96,00	84,13	0,69	0,60	2,87	11,26
1,10	30	3	18	60	48,49	39,81	0,81	0,66	3,32	10,08
1,10	30	3	18	100	76,49	63,25	0,76	0,63	2,45	11,40
1,10	30	3	18	140	105,00	92,41	0,75	0,66	2,58	12,24
1,10	30	9	18	60	48,03	38,40	0,80	0,64	3,69	12,16
1,10	30	9	18	100	74,02	60,62	0,74	0,61	3,60	11,98
1,10	30	9	18	140	101,07	87,24	0,72	0,62	2,34	11,39
1,10	70	3	18	60	47,21	39,62	0,79	0,66	2,36	10,66
1,10	70	3	18	100	77,02	63,87	0,77	0,64	1,82	11,91
1,10	70	3	18	140	101,87	90,69	0,73	0,65	3,63	9,75
1,10	70	9	18	60	49,38	39,80	0,82	0,66	2,83	11,95
1,10	70	9	18	100	75,59	68,09	0,76	0,68	4,54	12,03
1,10	70	9	18	140	106,19	88,79	0,76	0,63	2,99	12,17
1,10	10	6	12	100	64,38	62,01	0,64	0,62	12,08	12,16
1,10	90	6	12	100	78,84	68,94	0,79	0,69	3,28	12,07
1,10	50	0	12	100	78,71	64,42	0,79	0,64	2,12	11,54
1,10	50	12	12	100	78,47	65,11	0,78	0,65	2,63	12,09
1,10	50	6	0	100	67,11	63,37	0,67	0,63	3,53	11,09
1,10	50	6	24	100	71,46	63,01	0,71	0,63	3,17	11,72
1,10	50	6	12	20	17,08	16,00	0,85	0,80	9,20	11,83
1,10	50	6	12	180	119,16	110,70	0,66	0,61	5,99	11,97
1,10	50	6	12	100	71,93	69,31	0,72	0,69	9,01	10,86
1,10	50	6	12	100	72,70	66,91	0,73	0,67	6,83	12,08
1,10	50	6	12	100	73,43	64,25	0,73	0,64	2,36	11,66
1,10	50	6	12	100	69,38	63,22	0,69	0,63	4,63	12,38
1,10	50	6	12	100	73,06	67,04	0,73	0,67	3,28	12,01
1,10	50	6	12	100	70,86	67,46	0,71	0,67	4,92	12,22

Areia: D50 0,60 mm - Tensões Cisalhantes e Deslocamentos

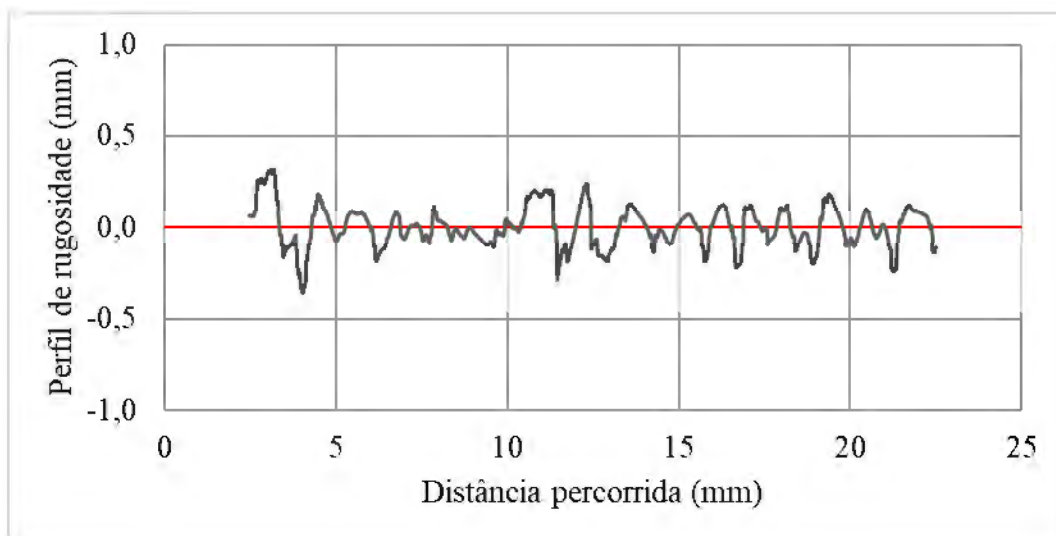
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	S (kPa)	τ_p (kPa)	τ_{pp} (kPa)	$(\tau/\sigma)_p$	$(\tau/\sigma)_{pp}$	dp (mm)	dpp (mm)
0,60	30	3	60	38,85	36,86	0,65	0,61	5,77	9,82
0,60	30	3	100	63,51	62,43	0,64	0,62	9,13	10,68
0,60	30	3	140	92,14	91,80	0,66	0,66	12,40	12,40
0,60	30	9	60	41,09	36,09	0,68	0,60	2,94	8,73
0,60	30	9	100	75,06	69,46	0,75	0,69	2,63	10,34
0,60	30	9	140	98,08	90,88	0,70	0,65	4,41	8,73
0,60	70	3	60	44,96	35,49	0,75	0,59	2,07	9,18
0,60	70	3	100	72,56	60,79	0,73	0,61	3,20	12,23
0,60	70	3	140	93,06	87,46	0,66	0,62	3,81	9,45
0,60	70	9	60	46,39	33,19	0,77	0,55	1,58	8,40
0,60	70	9	100	73,30	57,44	0,73	0,57	2,13	8,84
0,60	70	9	140	95,36	85,86	0,68	0,61	2,88	7,72
0,60	10	6	100	72,26	71,75	0,72	0,72	11,53	11,78
0,60	90	6	100	85,22	69,94	0,85	0,70	2,34	8,71
0,60	50	0	100	66,37	57,20	0,66	0,57	5,35	12,32
0,60	50	12	100	73,65	69,77	0,74	0,70	4,35	10,31
0,60	50	6	20	18,75	12,67	0,94	0,63	2,44	10,93
0,60	50	6	180	126,90	119,84	0,70	0,67	5,02	12,16
0,60	50	6	100	76,87	66,98	0,77	0,67	2,50	9,35
0,60	50	6	100	75,55	66,11	0,76	0,66	3,01	9,76
0,60	50	6	100	73,33	64,53	0,73	0,65	3,10	11,73
0,60	50	6	100	70,77	59,96	0,71	0,60	3,33	12,32
0,60	50	6	100	74,82	68,50	0,75	0,68	3,93	9,63
0,60	50	6	100	76,18	70,99	0,76	0,71	6,28	10,16

Areia: D50 1,10 mm - Tensões Cisalhantes e Deslocamentos

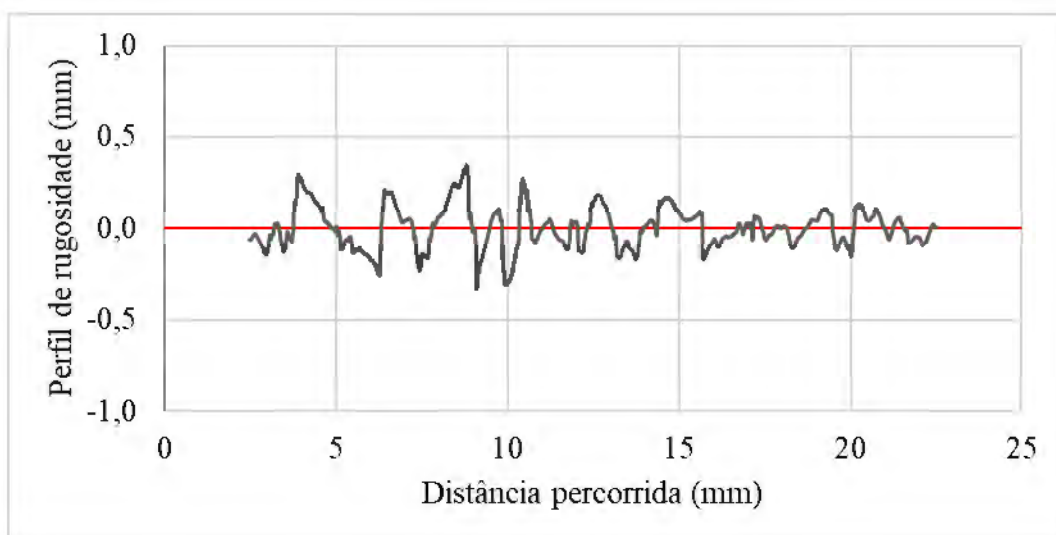
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	S (kPa)	τ_p (kPa)	τ_{pp} (kPa)	$(\tau/\sigma)_p$	$(\tau/\sigma)_{pp}$	dp (mm)	dpp (mm)
1,10	30	3	60	46,64	43,15	0,78	0,72	5,15	12,25
1,10	30	3	100	73,64	70,46	0,74	0,70	8,40	11,98
1,10	30	3	140	101,16	94,50	0,72	0,68	8,27	12,16
1,10	30	9	60	42,98	34,38	0,72	0,57	2,84	9,89
1,10	30	9	100	69,22	62,44	0,69	0,62	3,52	11,77
1,10	30	9	140	107,45	101,33	0,77	0,72	5,75	11,71
1,10	70	3	60	39,12	34,62	0,65	0,58	5,16	11,59
1,10	70	3	100	77,15	71,64	0,77	0,72	4,94	11,23
1,10	70	3	140	100,94	94,00	0,72	0,67	7,61	12,29
1,10	70	9	60	43,16	33,59	0,72	0,56	1,71	9,27
1,10	70	9	100	77,91	56,99	0,78	0,57	2,03	11,25
1,10	70	9	140	99,15	86,73	0,71	0,62	3,35	10,58
1,10	10	6	100	69,47	66,71	0,69	0,67	7,78	11,93
1,10	90	6	100	90,04	72,98	0,90	0,73	3,22	11,76
1,10	50	0	100	66,12	57,13	0,66	0,57	6,49	11,75
1,10	50	12	100	79,02	65,78	0,79	0,66	2,66	11,41
1,10	50	6	20	15,71	11,44	0,79	0,57	1,50	11,91
1,10	50	6	180	128,27	122,54	0,71	0,68	6,05	11,57
1,10	50	6	100	69,59	60,44	0,70	0,60	2,70	11,52
1,10	50	6	100	67,18	60,57	0,67	0,61	4,30	11,37
1,10	50	6	100	70,57	61,64	0,71	0,62	2,73	11,71
1,10	50	6	100	67,36	59,64	0,67	0,60	2,65	11,24
1,10	50	6	100	71,91	65,02	0,72	0,65	4,69	12,43
1,10	50	6	100	75,85	69,40	0,76	0,69	3,61	11,53

APÊNDICE 3 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE**Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 20 kPa**

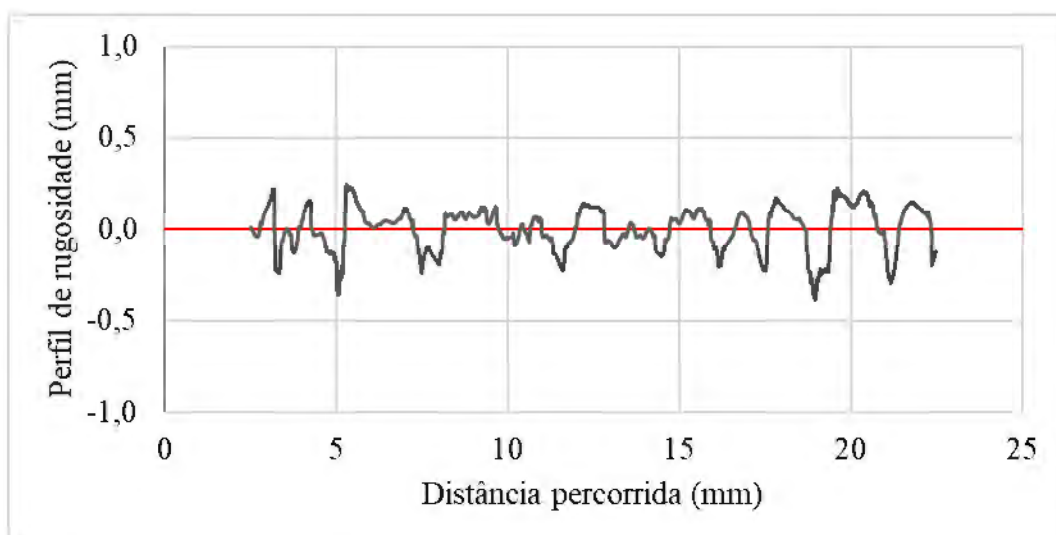
a)



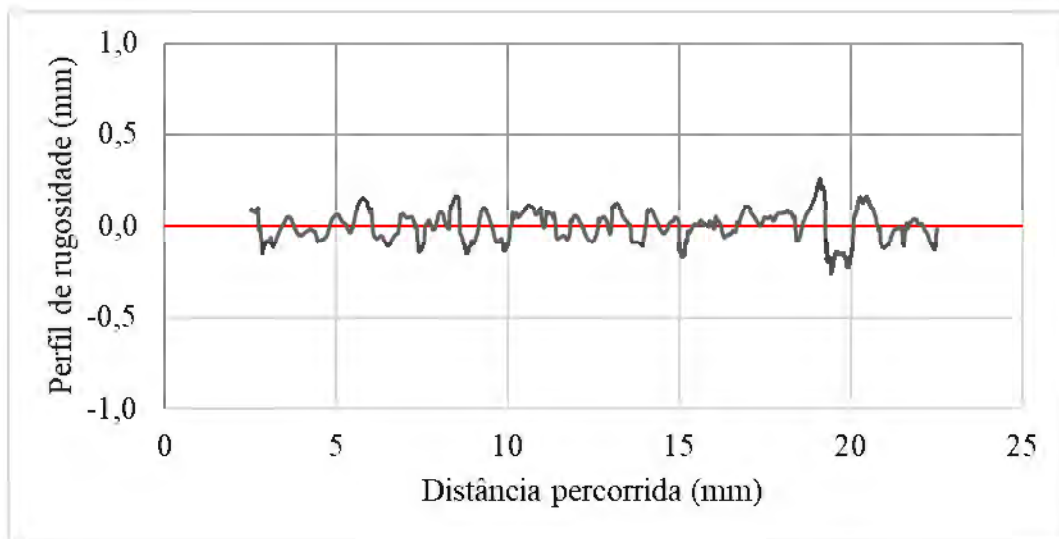
b)



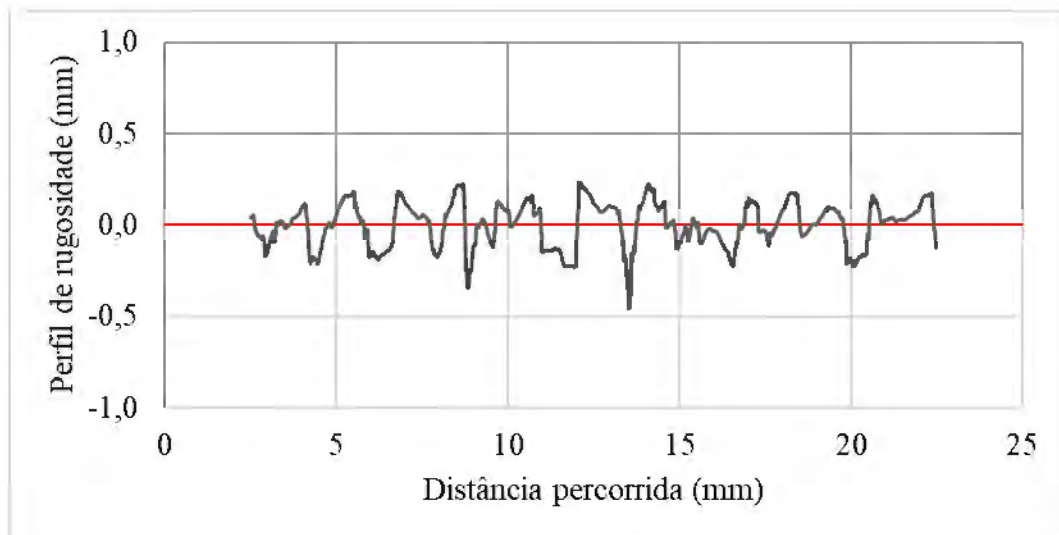
c)



d)



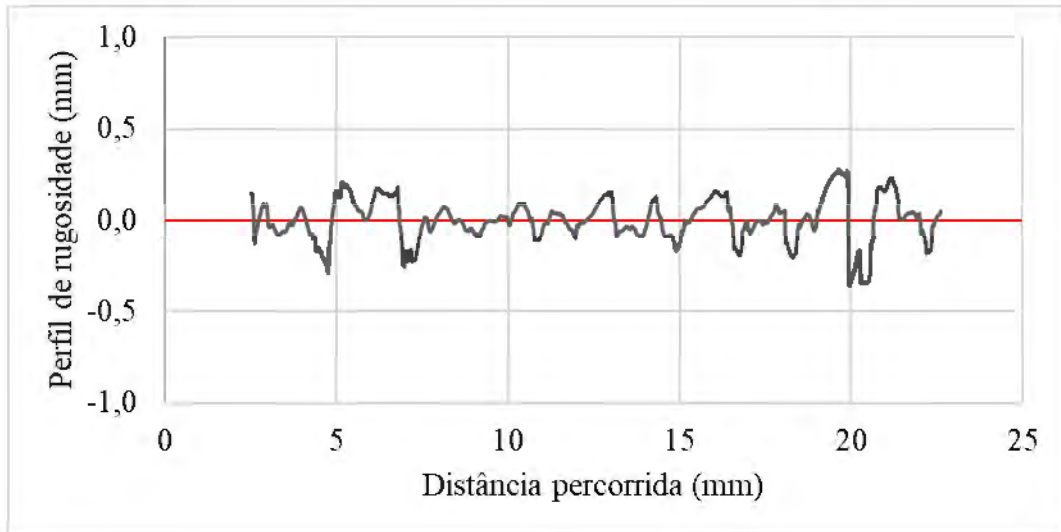
e)



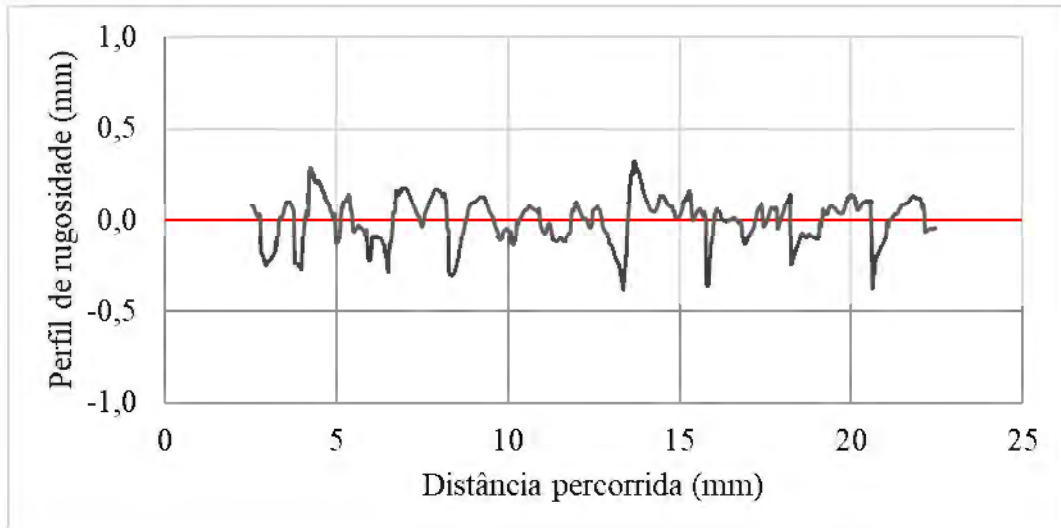
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	70	9	24	20	A	0,088	0,684	0,227	1,140	0,378
					B	0,091	0,697	0,221	1,162	0,369
					C	0,098	0,614	0,223	1,023	0,372
					D	0,067	0,534	0,174	0,890	0,291
					E	0,099	0,698	0,234	1,163	0,390
Média						0,089	0,645	0,216	1,076	0,360

Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 60 kPa

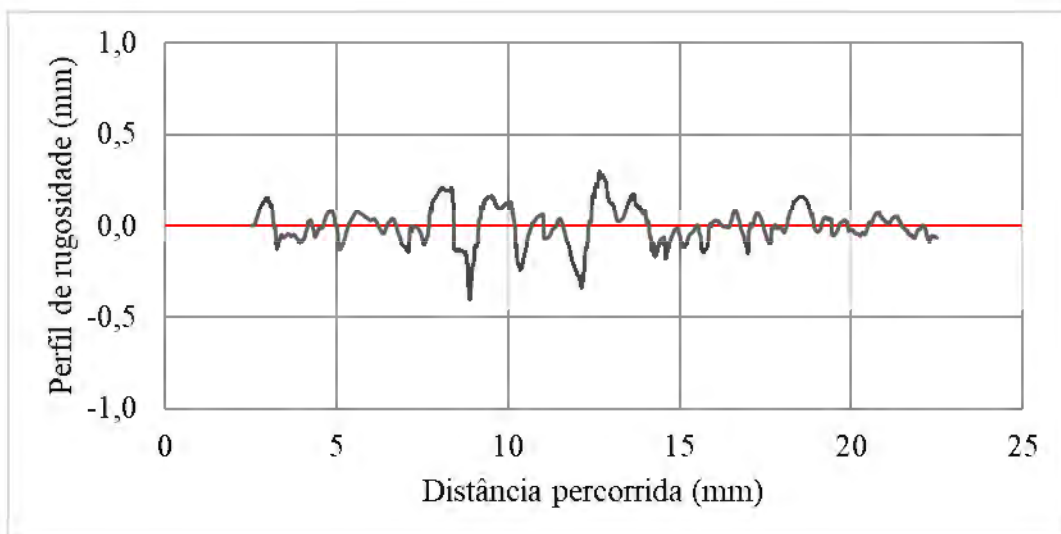
a)



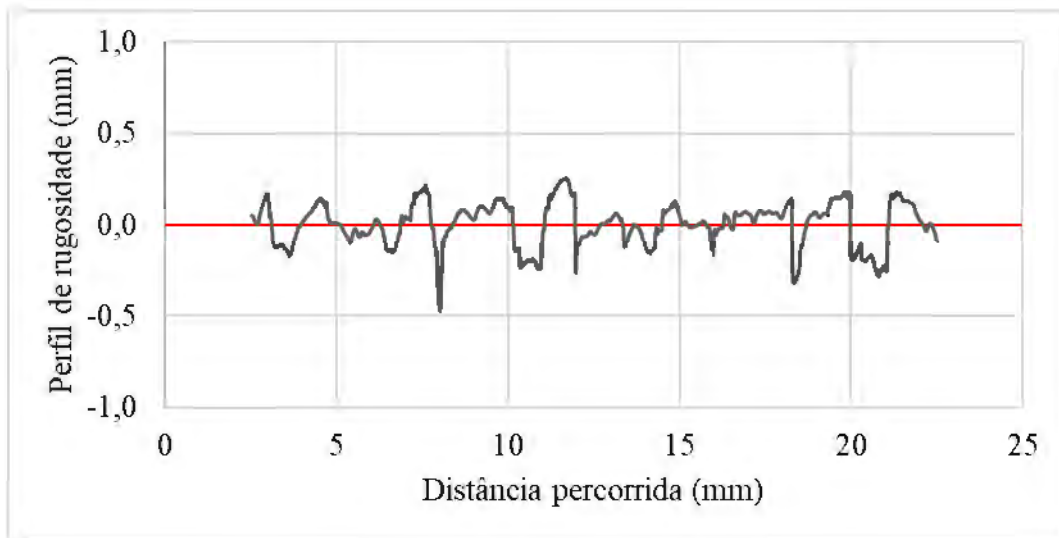
b)



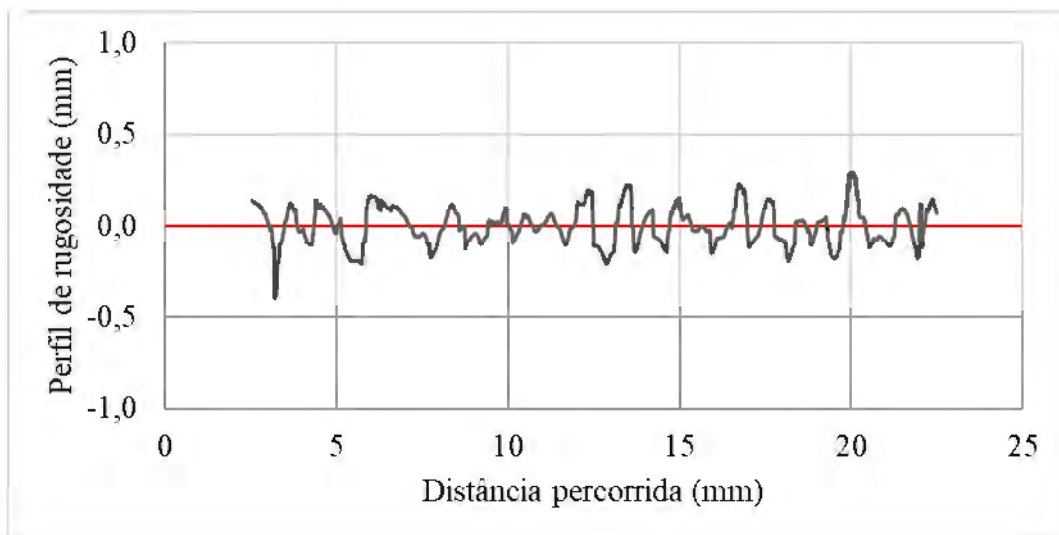
c)



d)



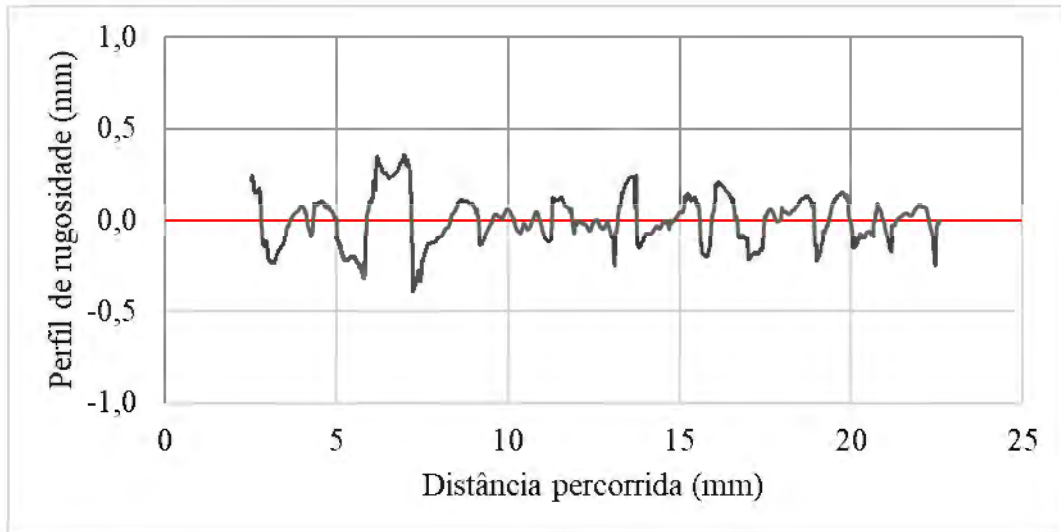
e)



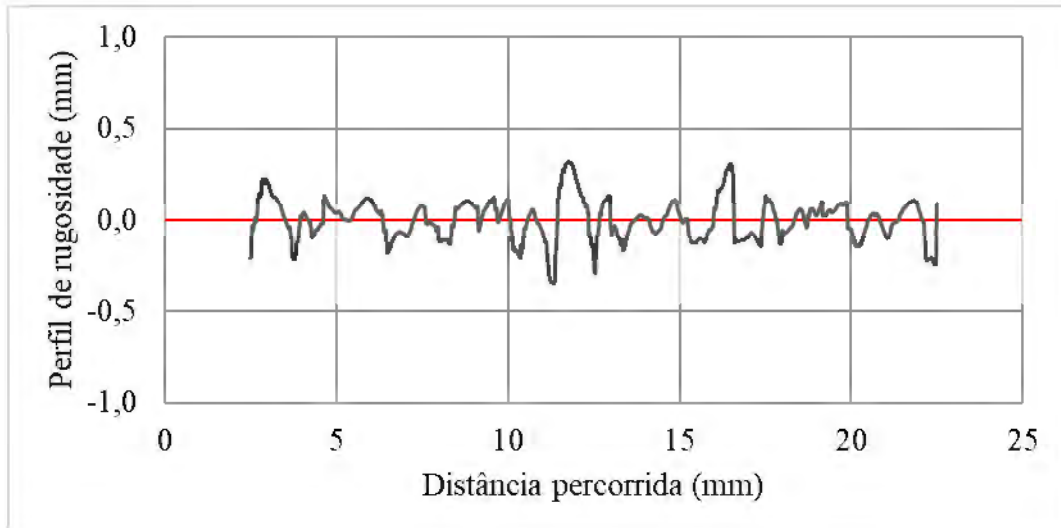
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	70	9	24	60	A	0,089	0,644	0,205	1,073	0,342
					B	0,098	0,732	0,248	1,220	0,414
					C	0,077	0,620	0,190	1,033	0,317
					D	0,093	0,698	0,209	1,163	0,348
					E	0,083	0,541	0,231	0,902	0,385
Média						0,088	0,647	0,217	1,078	0,361

Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 100 kPa

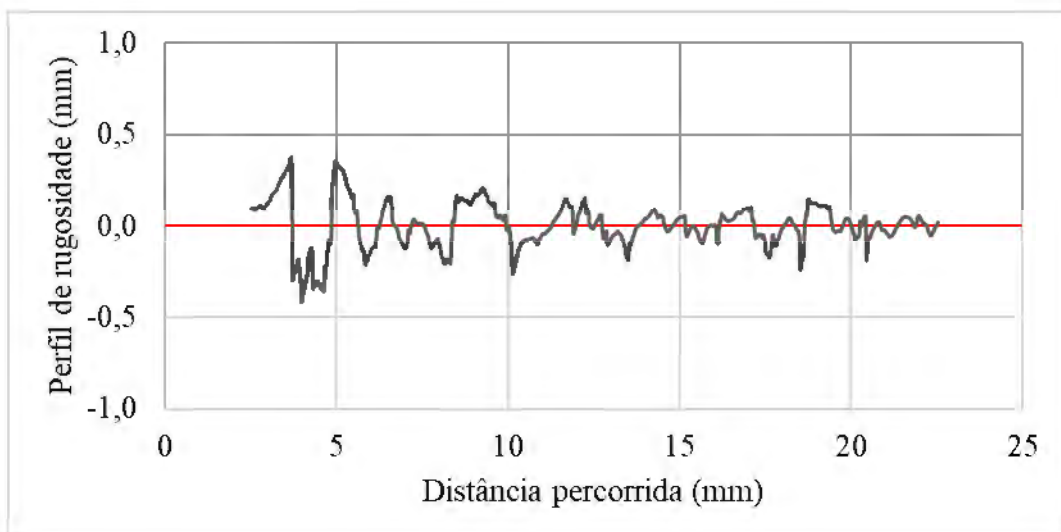
a)



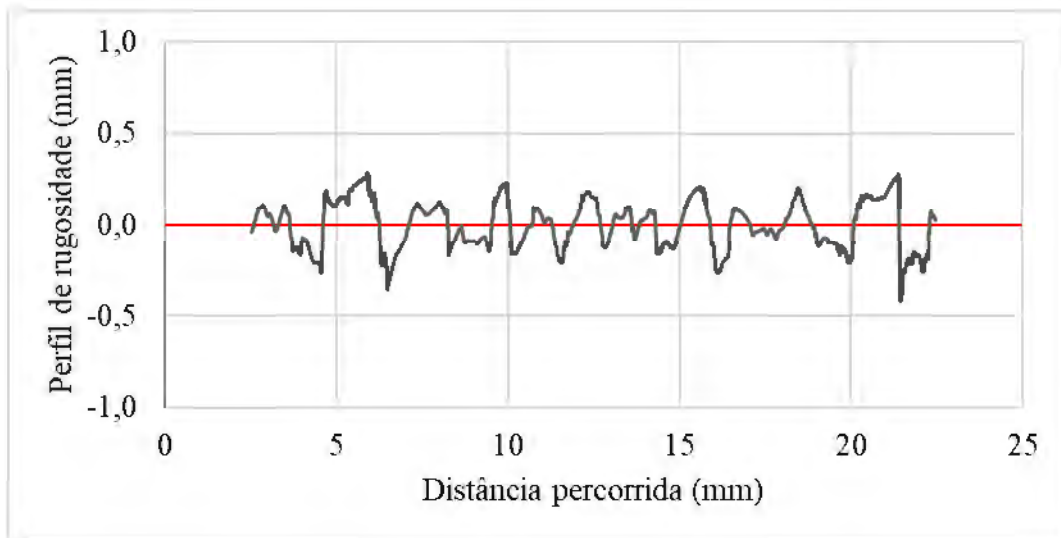
b)



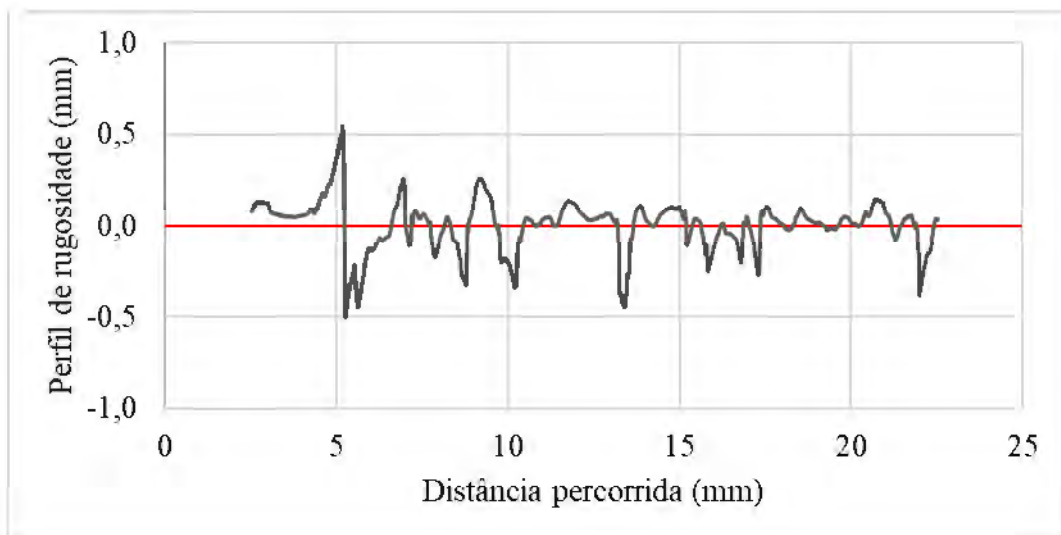
c)



d)



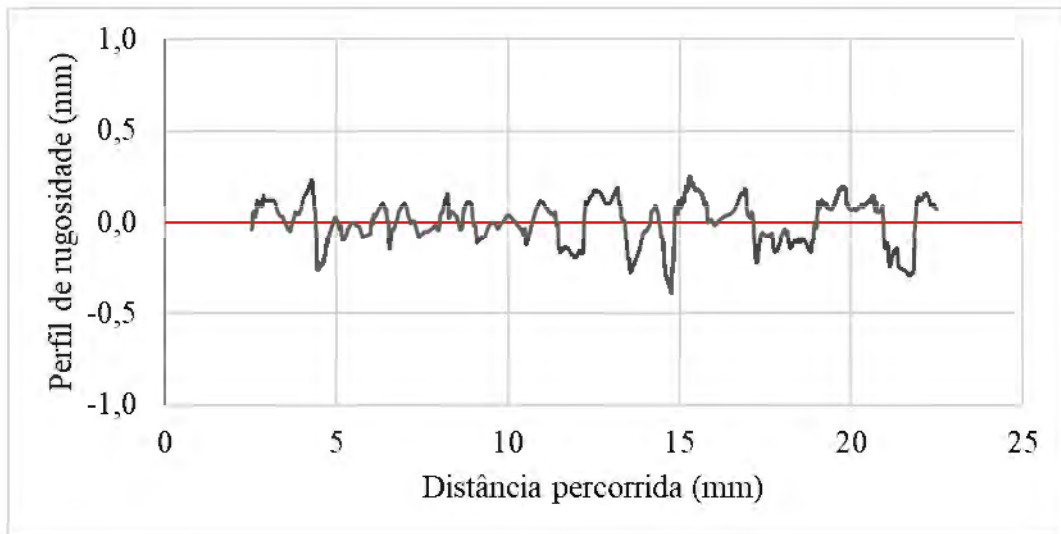
e)



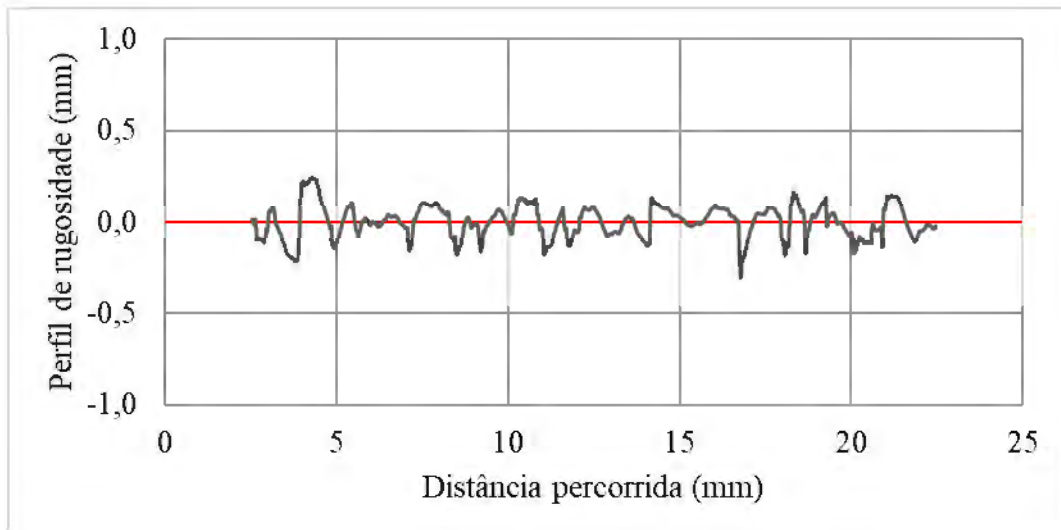
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	70	9	24	100	A	0,103	0,774	0,236	1,290	0,393
					B	0,087	0,675	0,218	1,125	0,364
					C	0,093	0,795	0,213	1,325	0,355
					D	0,112	0,710	0,238	1,183	0,397
					E	0,098	1,062	0,235	1,770	0,392
Média						0,099	0,803	0,228	1,339	0,380

Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 140 kPa

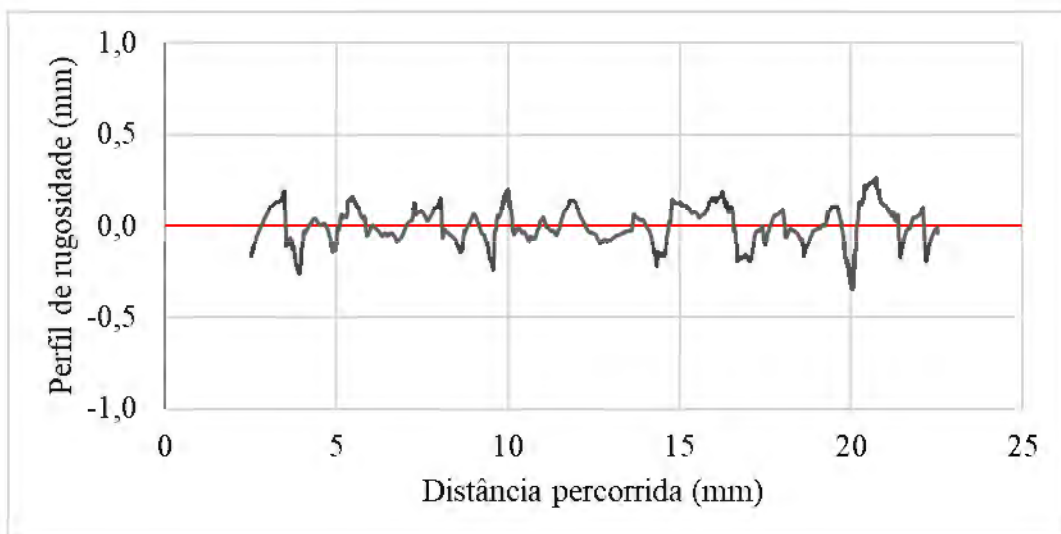
a)



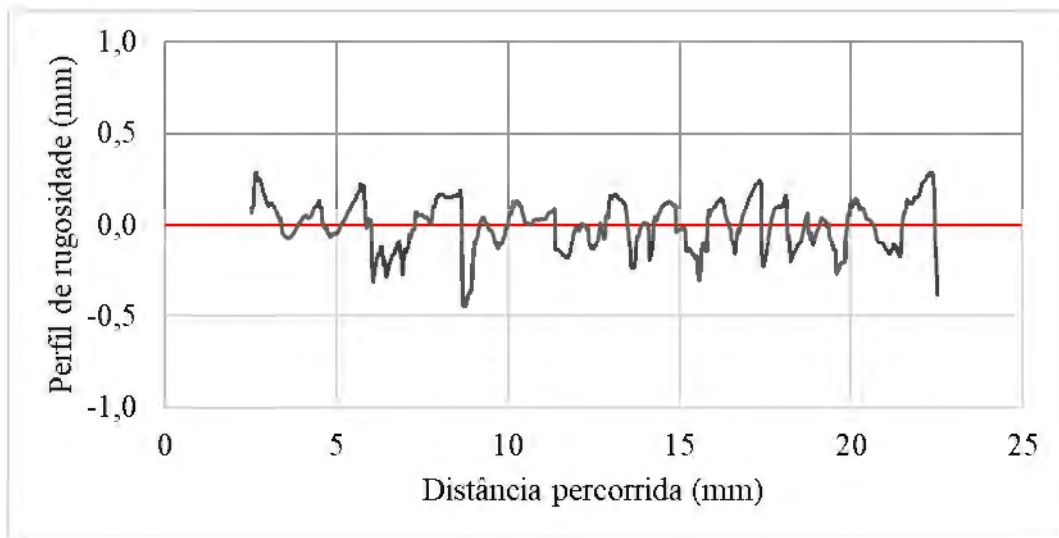
b)



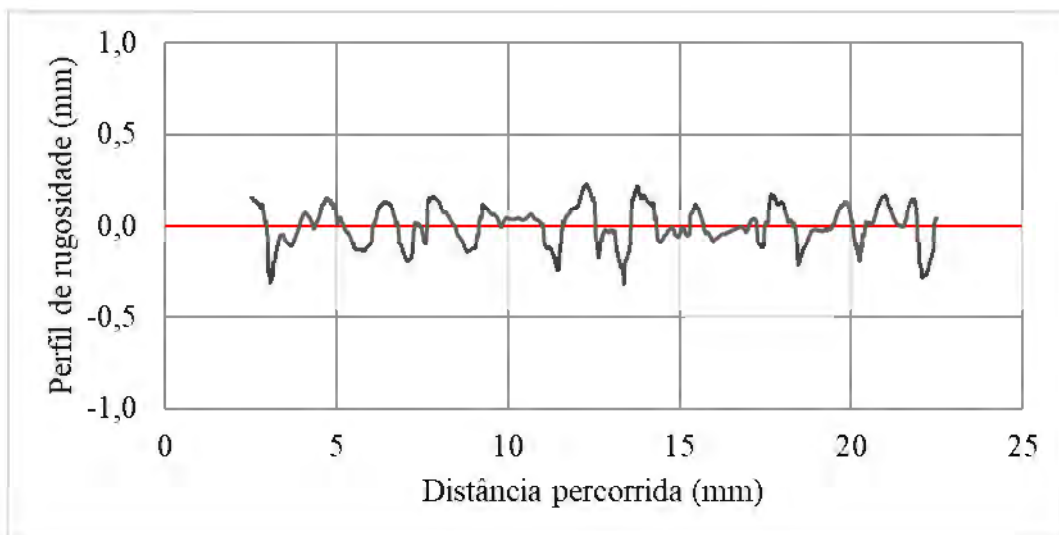
c)



d)



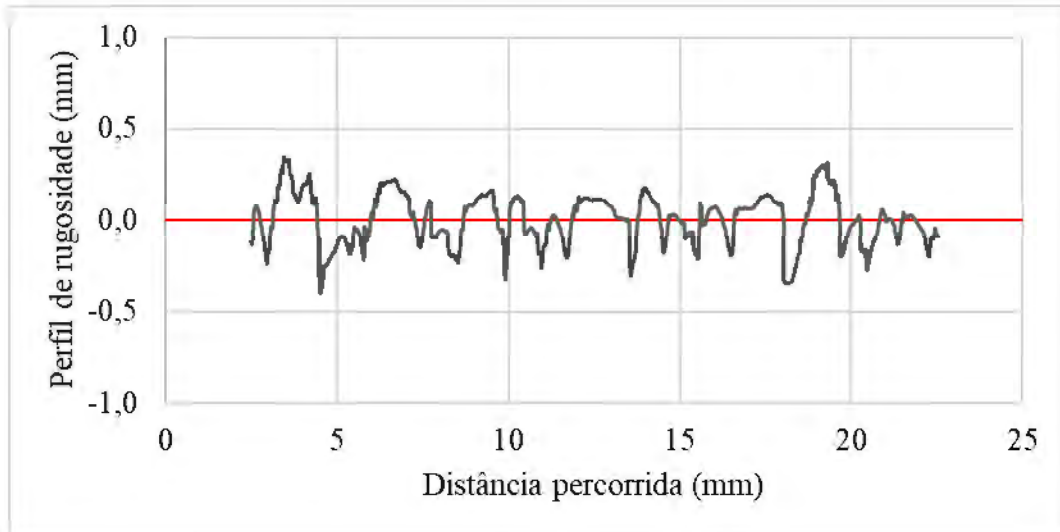
e)



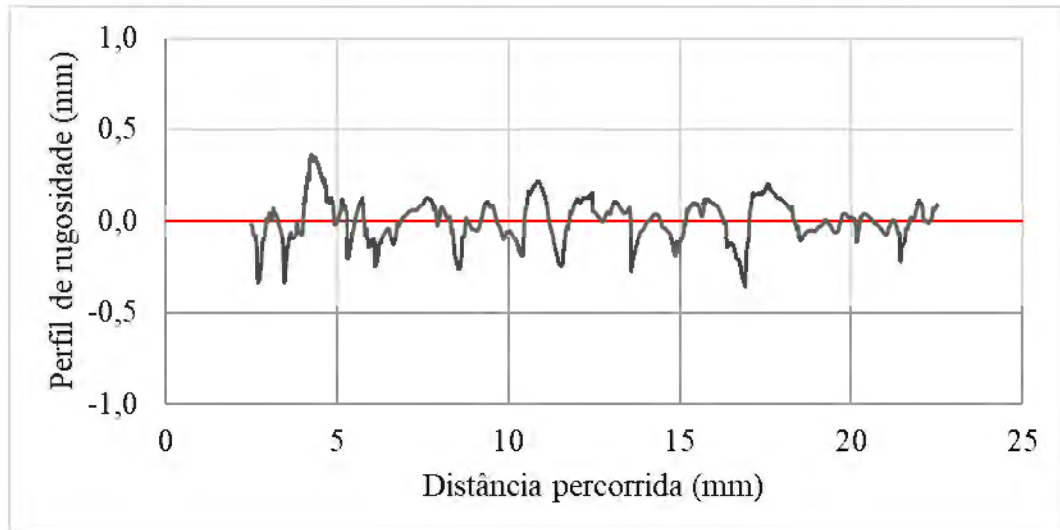
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	70	9	24	140	A	0,097	0,598	0,218	0,997	0,363
					B	0,070	0,467	0,191	0,778	0,318
					C	0,079	0,611	0,201	1,018	0,335
					D	0,107	0,638	0,255	1,063	0,424
					E	0,086	0,541	0,208	0,902	0,347
Média						0,088	0,571	0,214	0,952	0,357

Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 180 kPa

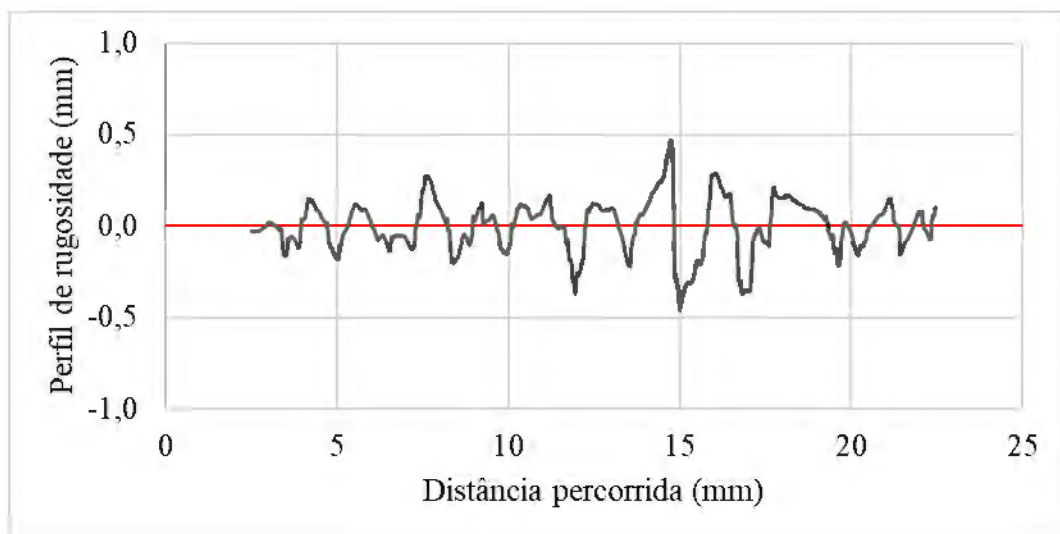
a)



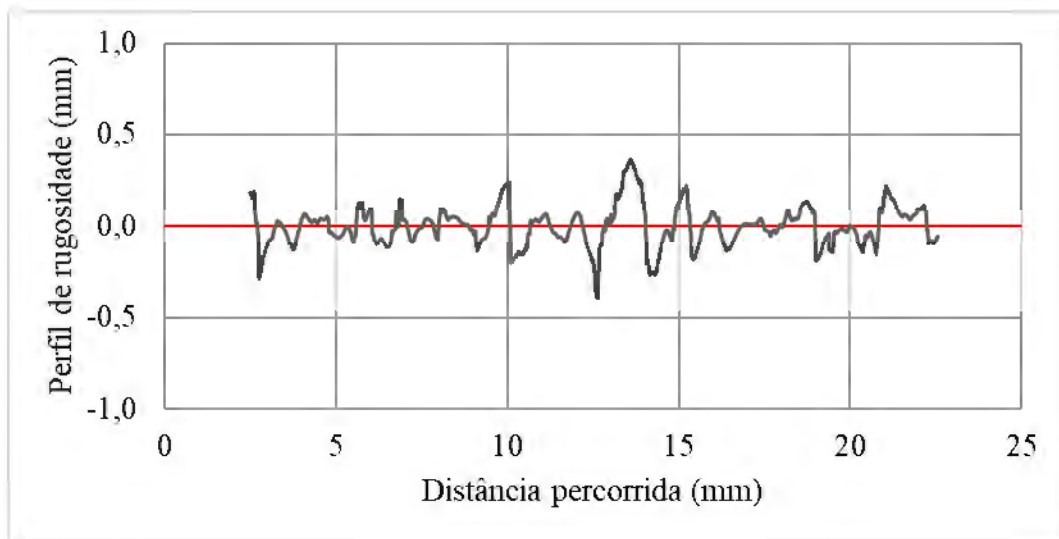
b)



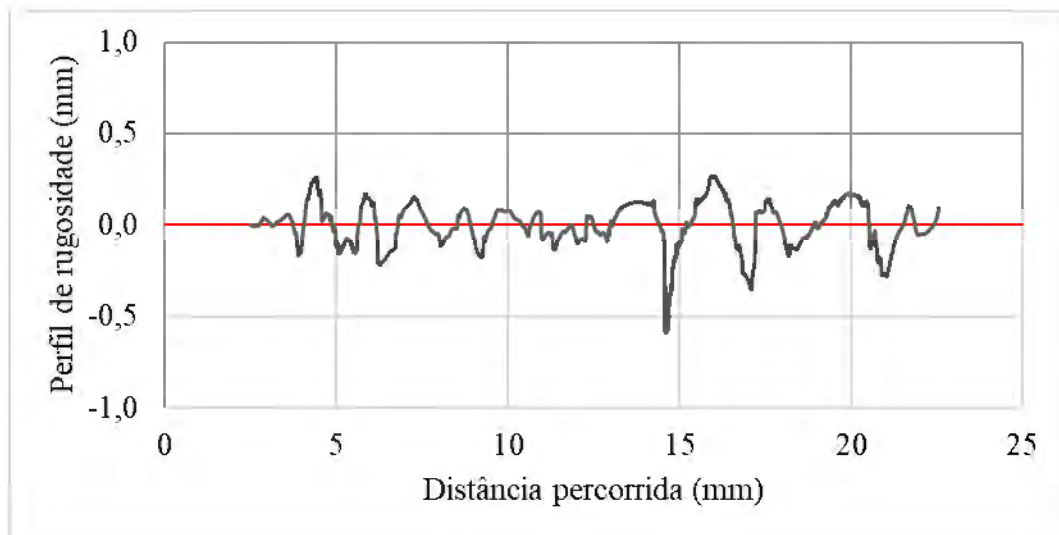
c)



d)



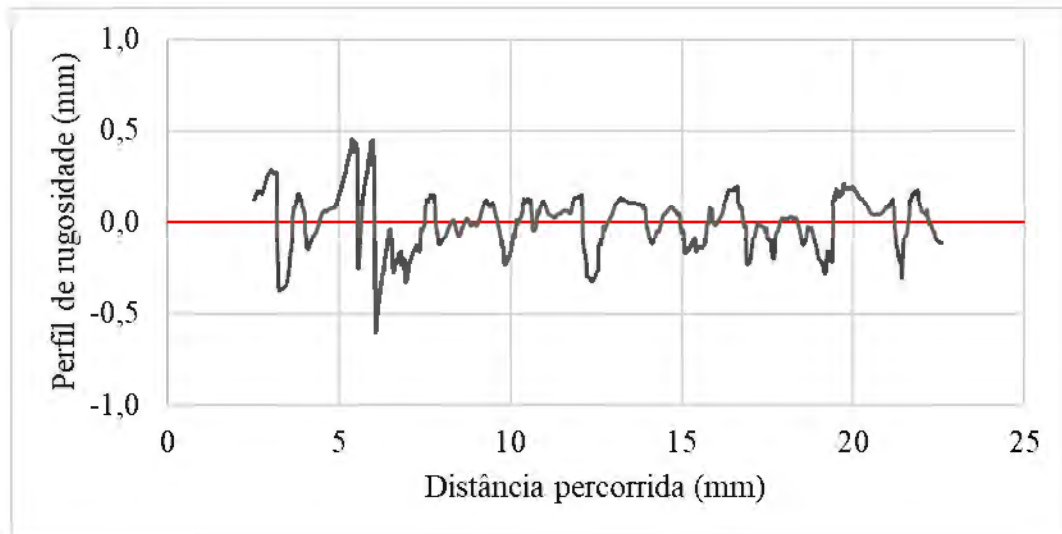
e)



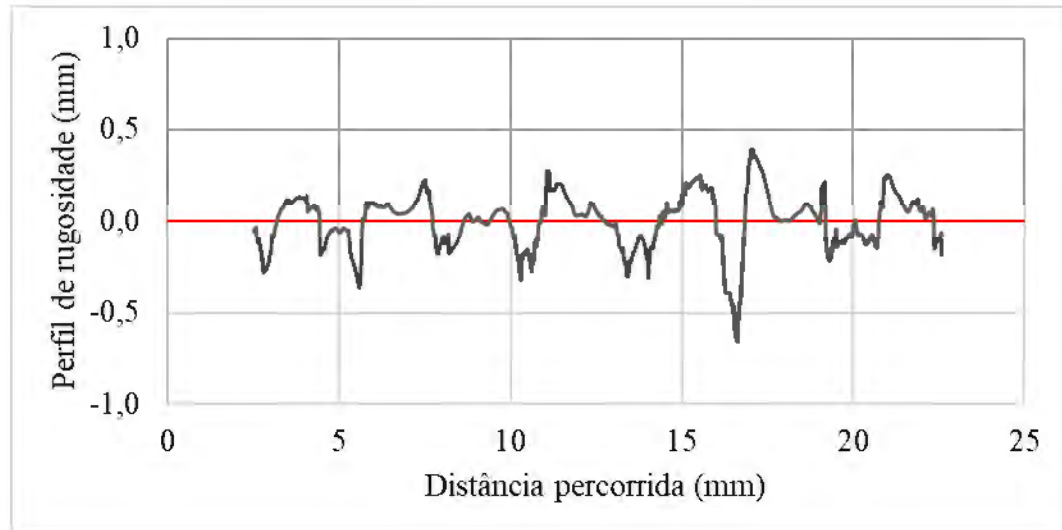
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	70	9	24	180	A	0,114	0,754	0,269	1,257	0,448
					B	0,089	0,705	0,227	1,175	0,378
					C	0,112	0,944	0,258	1,573	0,429
					D	0,083	0,772	0,215	1,287	0,358
					E	0,096	0,731	0,220	1,218	0,367
Média						0,099	0,781	0,238	1,302	0,396

Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 20 kPa

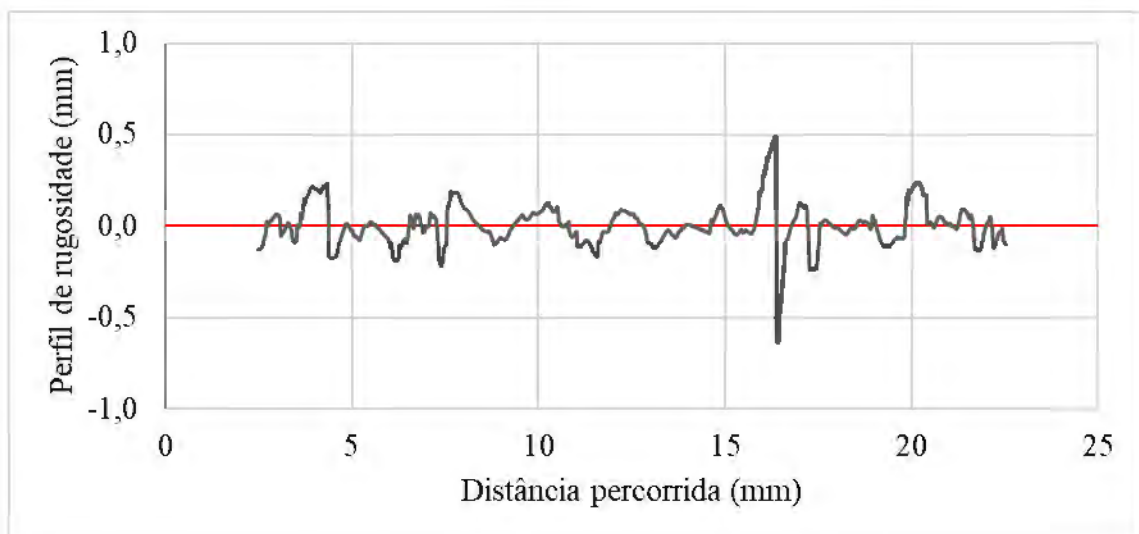
a)



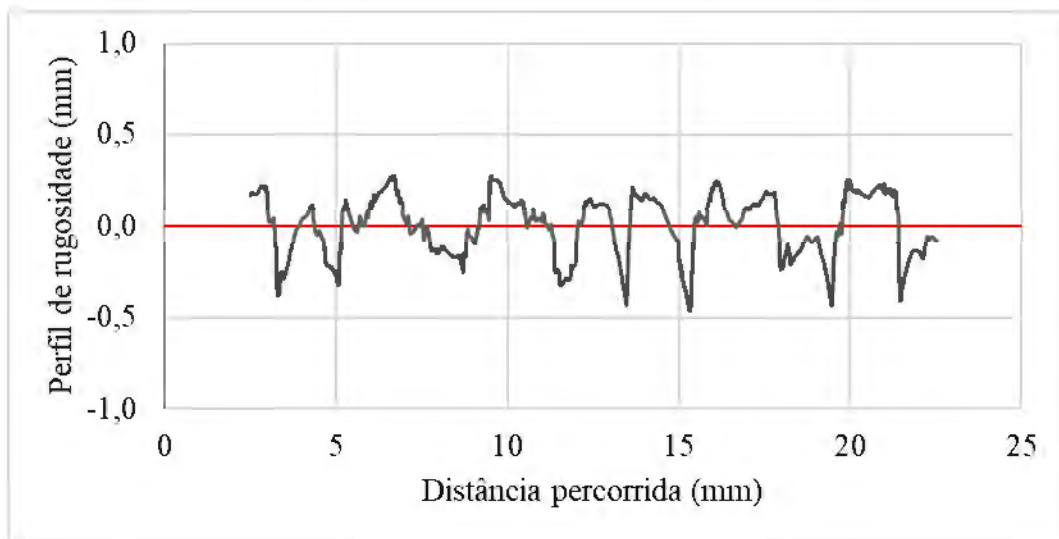
b)



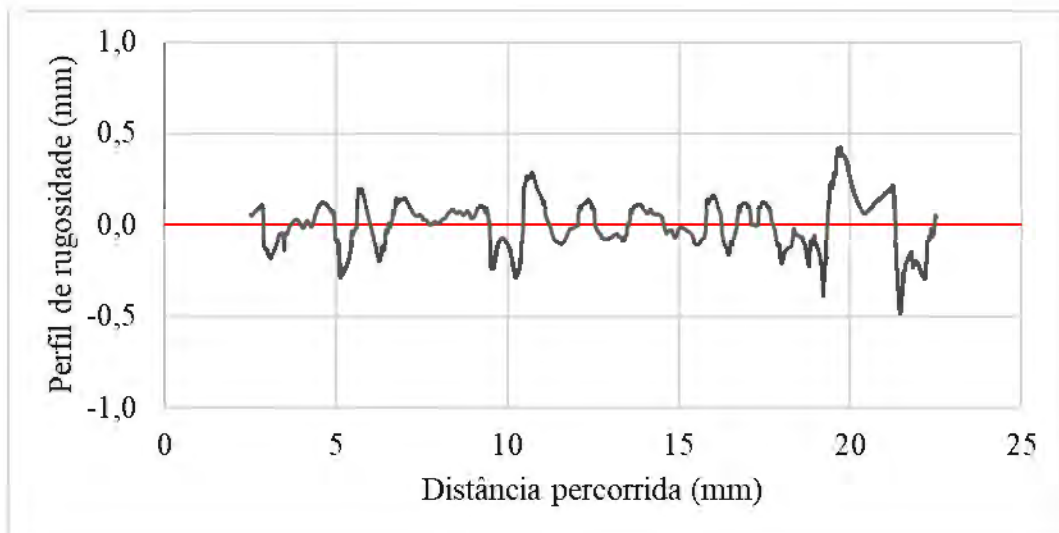
c)



d)



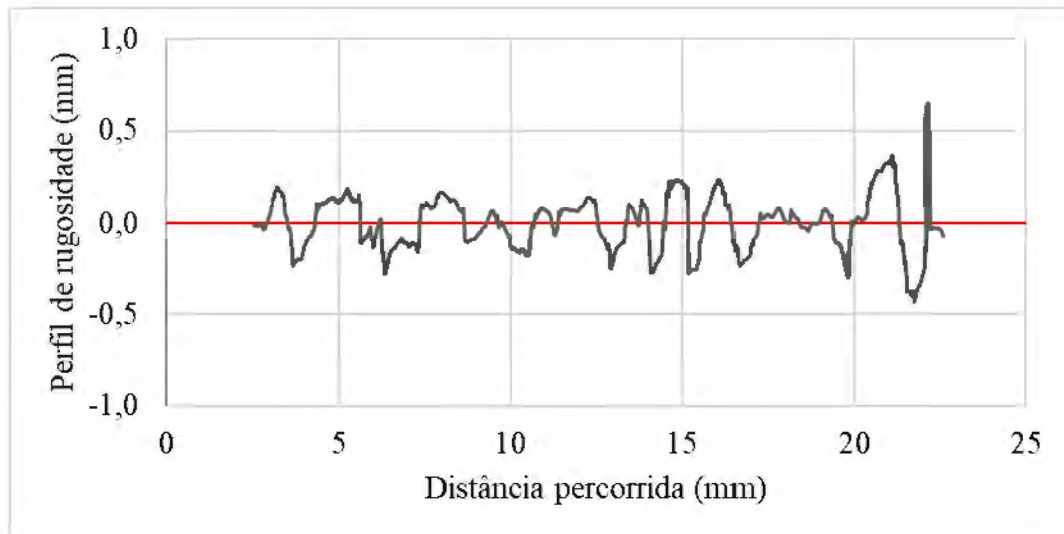
e)



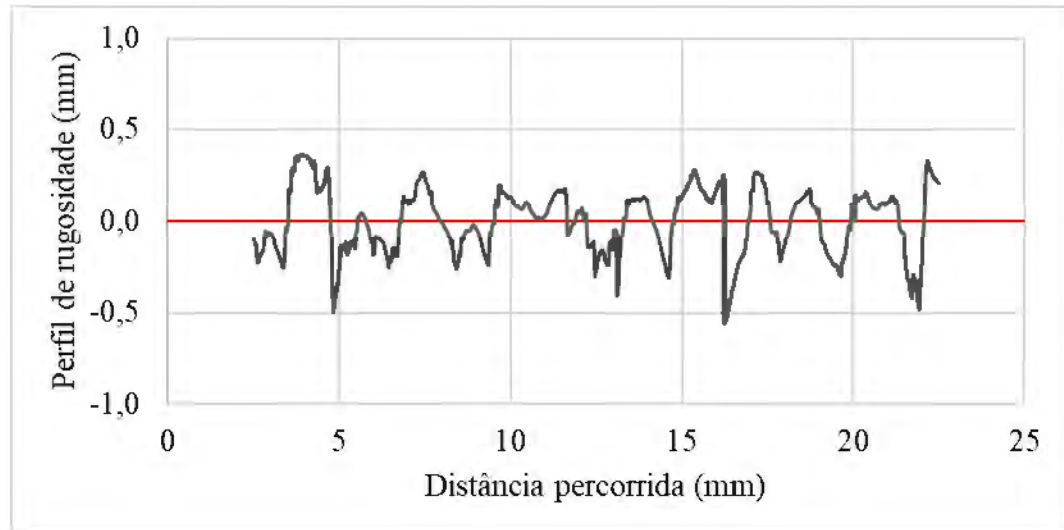
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
1,10	70	9	24	20	A	0,122	1,099	0,391	0,999	0,356
					B	0,118	1,062	0,360	0,965	0,328
					C	0,078	1,132	0,293	1,029	0,266
					D	0,138	0,725	0,406	0,659	0,369
					E	0,108	0,826	0,329	0,751	0,300
Média						0,113	0,969	0,356	0,881	0,324

Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 60 kPa

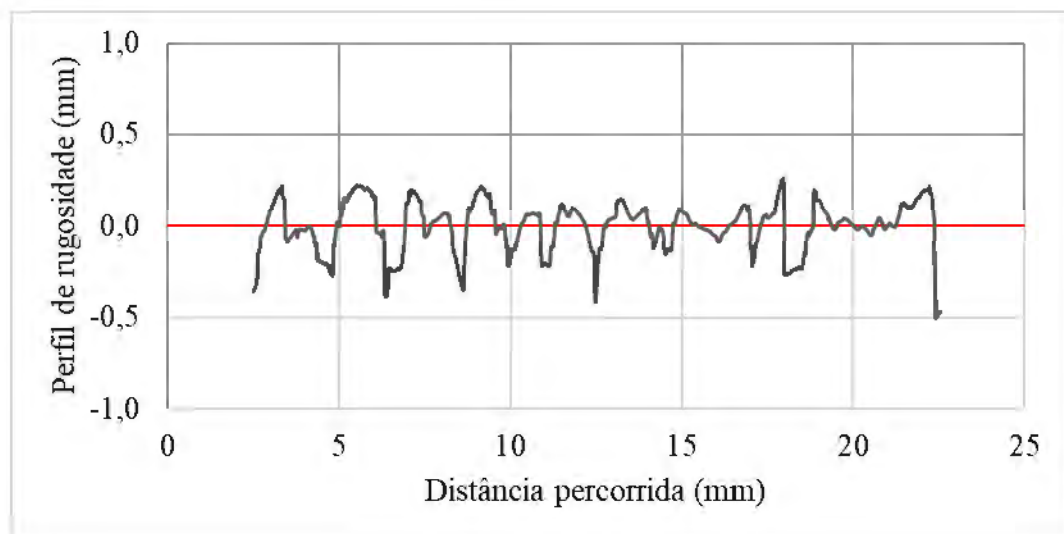
a)



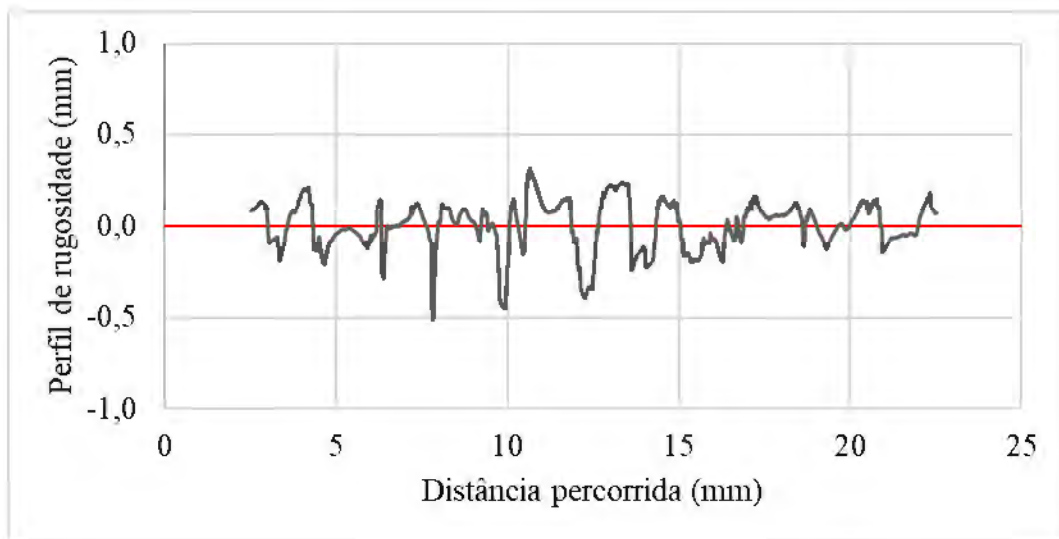
b)



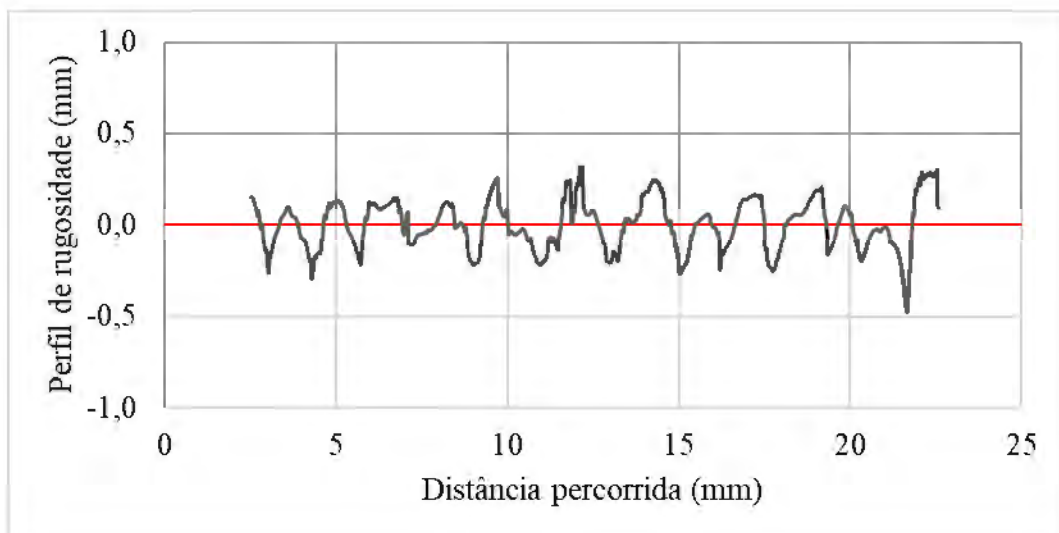
c)



d)



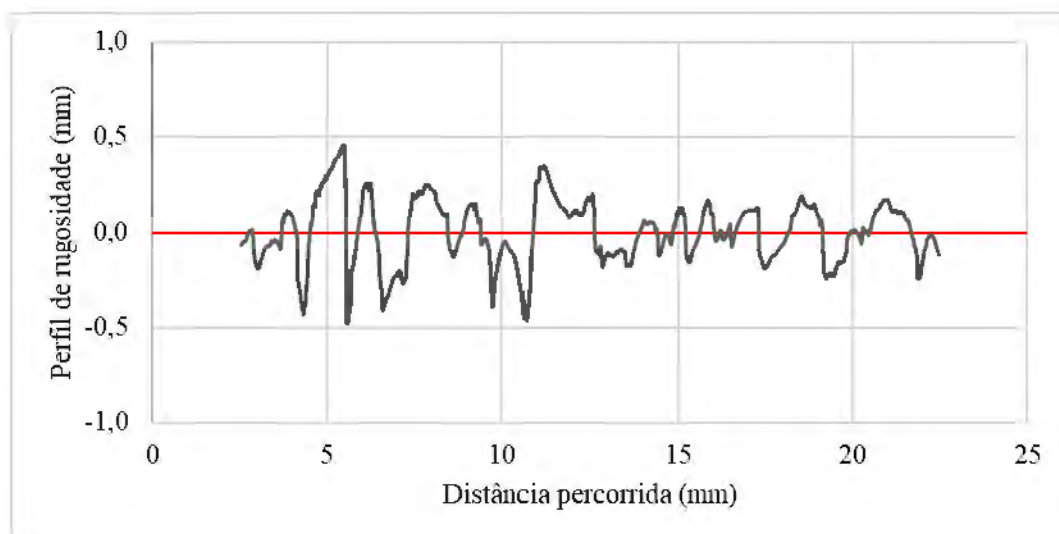
e)



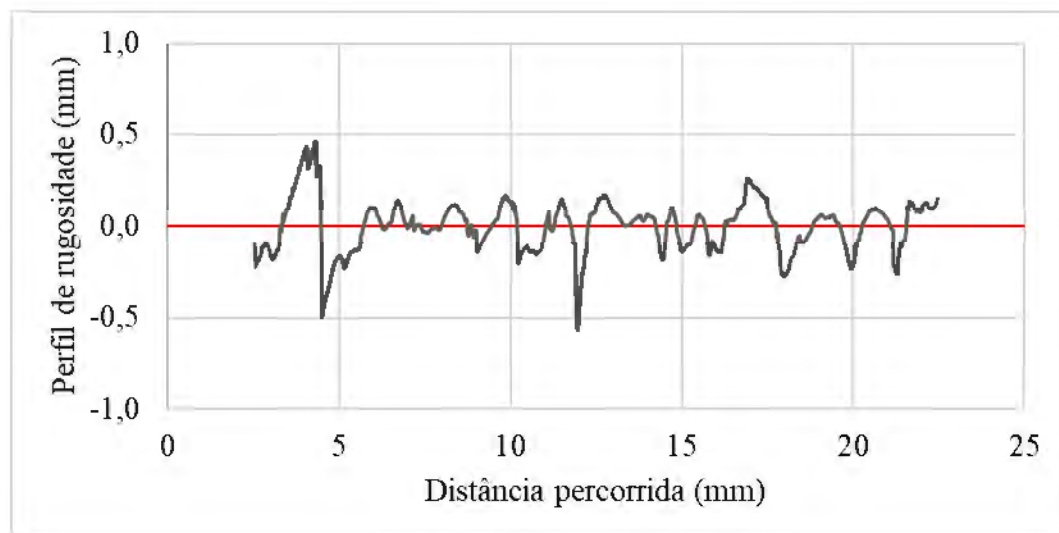
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
1,10	70	9	24	60	A	0,118	1,087	0,356	0,988	0,324
					B	0,150	0,896	0,457	0,815	0,416
					C	0,104	0,727	0,349	0,661	0,317
					D	0,105	0,711	0,364	0,646	0,331
					E	0,112	0,786	0,365	0,715	0,332
Média						0,118	0,841	0,378	0,765	0,344

Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 100 kPa

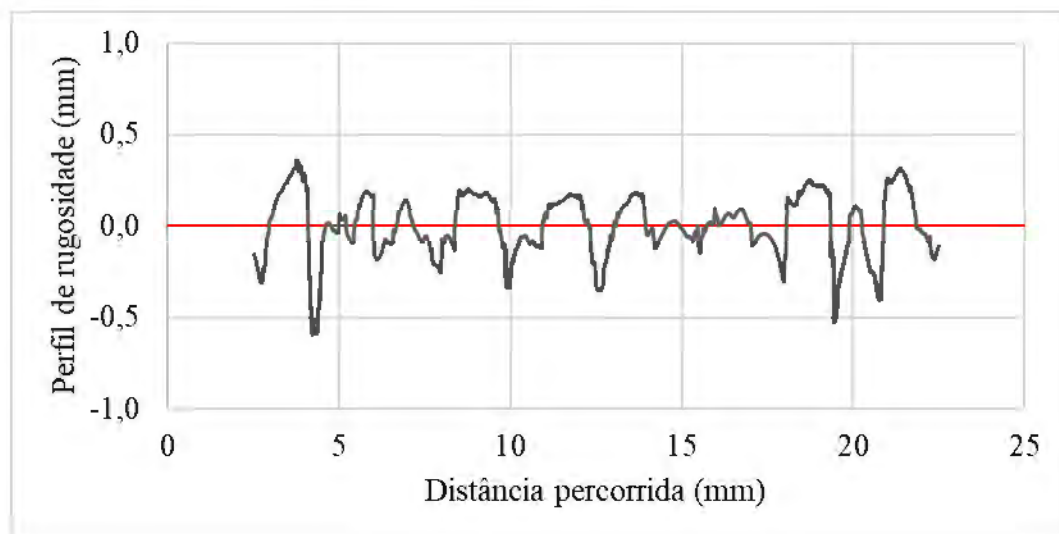
a)



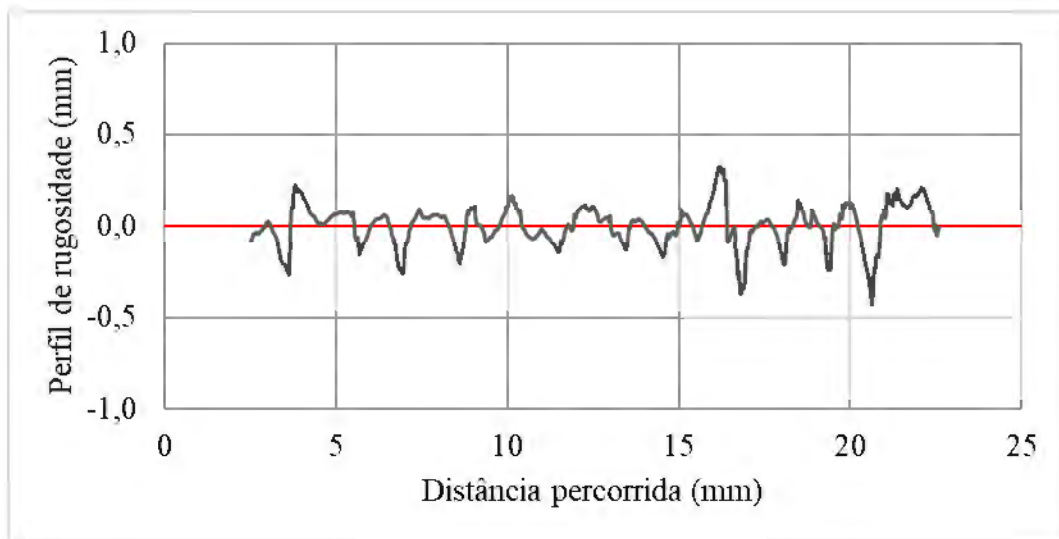
b)



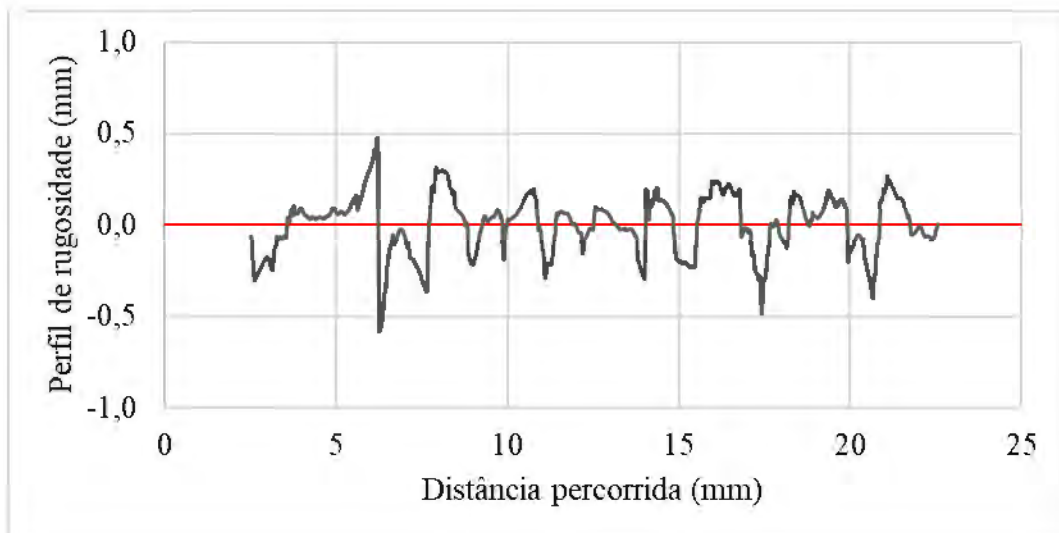
c)



d)



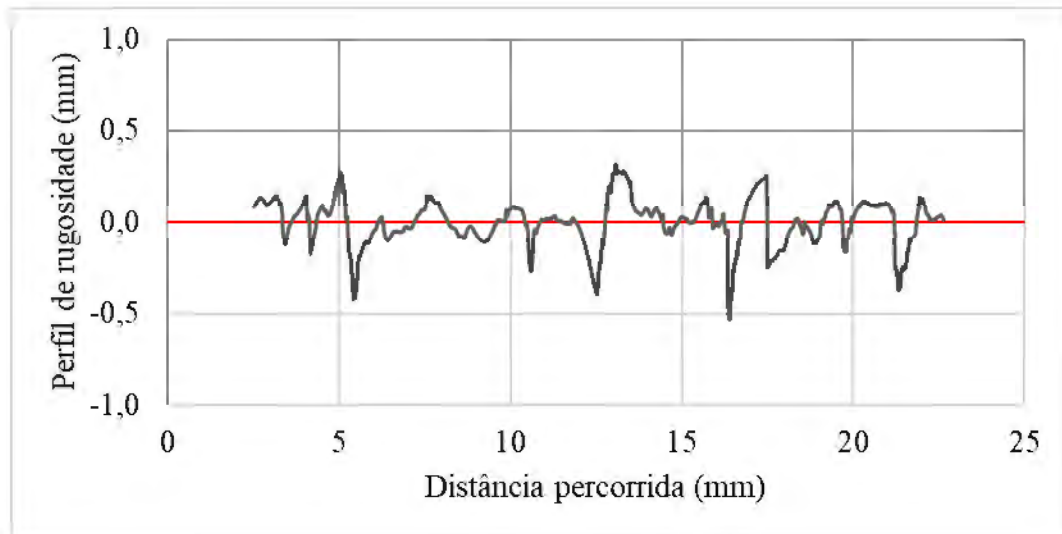
e)



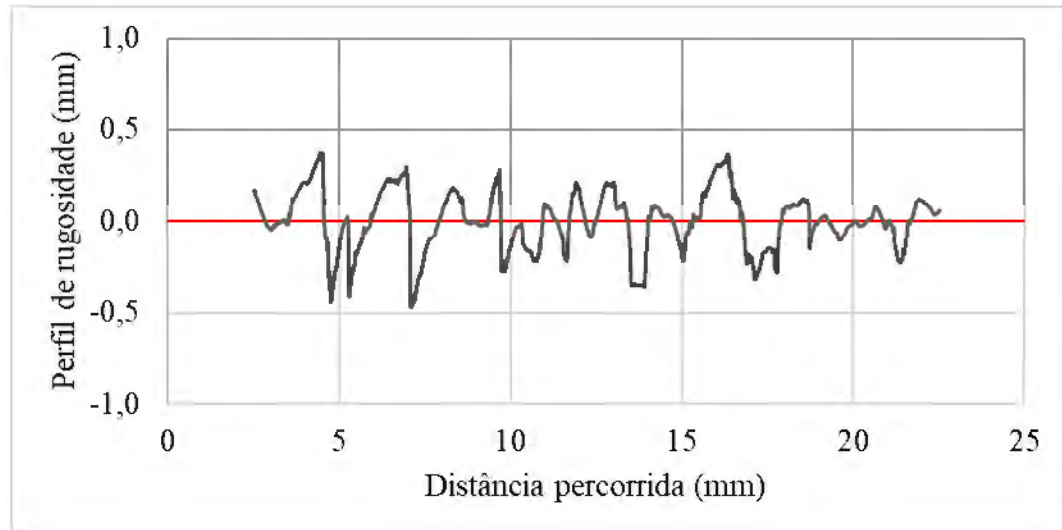
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
1,10	70	9	24	100	A	0,136	0,945	0,429	0,859	0,390
					B	0,109	0,980	0,356	0,891	0,324
					C	0,139	0,981	0,432	0,892	0,393
					D	0,084	0,702	0,308	0,638	0,280
					E	0,130	1,080	0,433	0,982	0,393
Média						0,120	0,938	0,392	0,852	0,356

Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 140 kPa

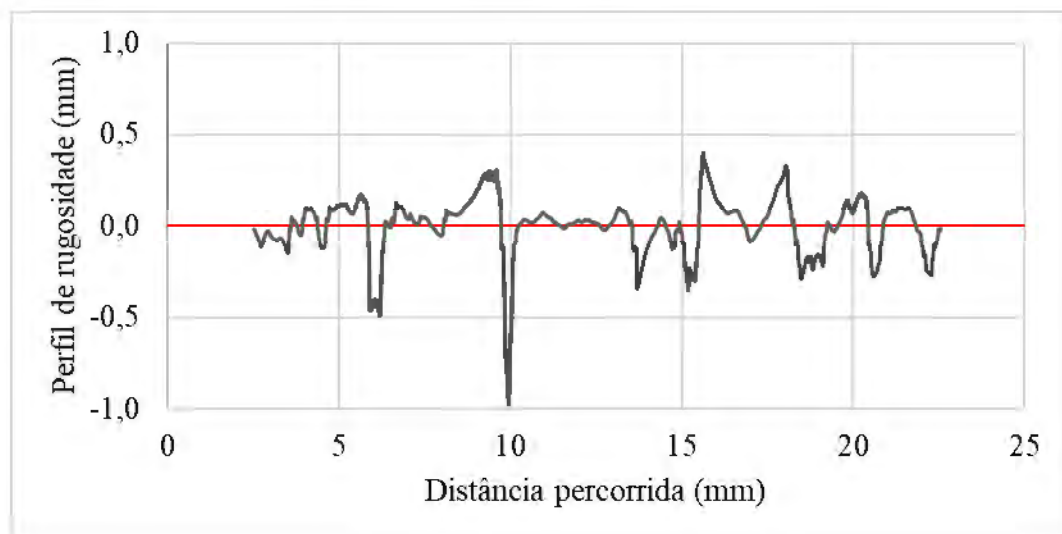
a)



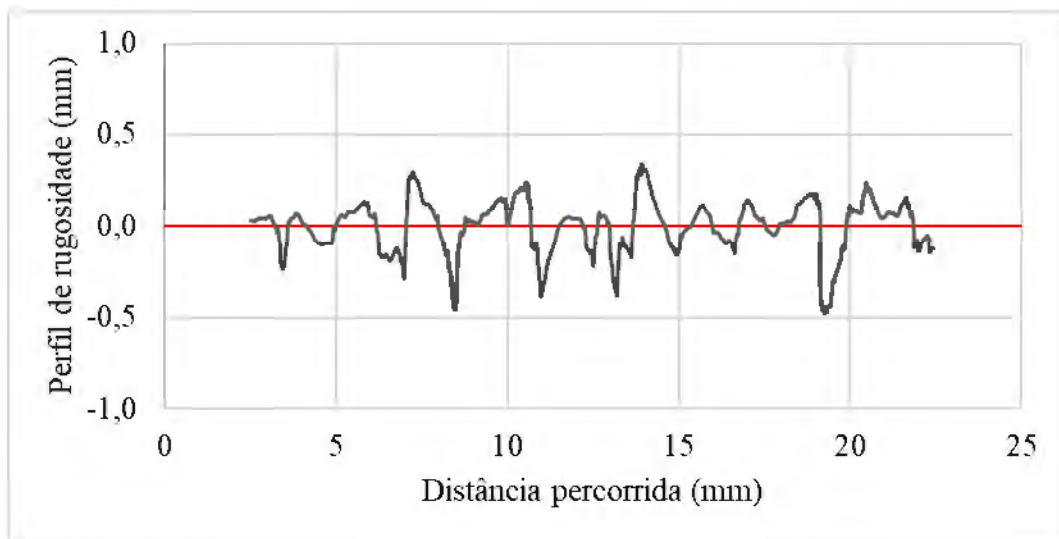
b)



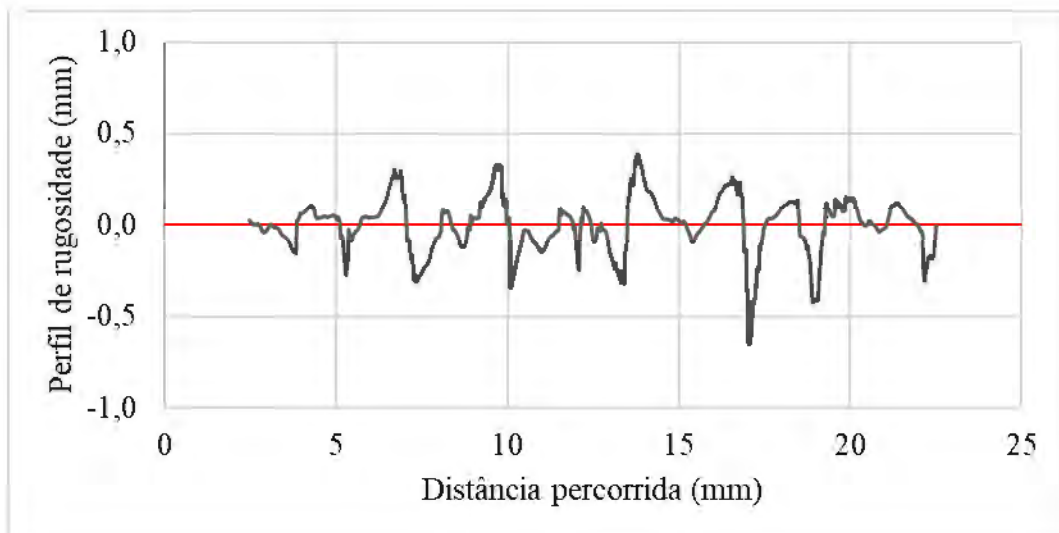
c)



d)



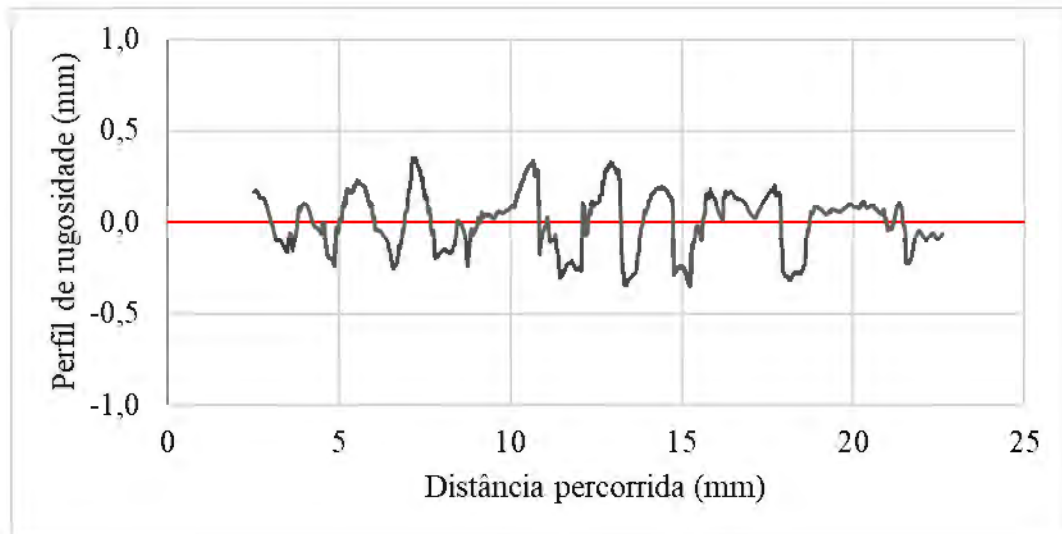
e)



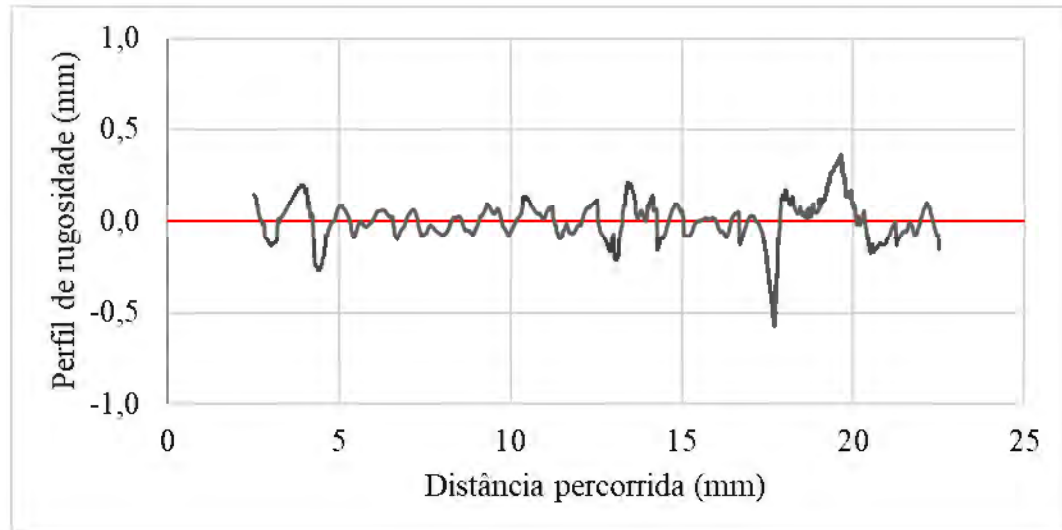
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
1,10	70	9	24	140	A	0,094	0,804	0,342	0,731	0,311
					B	0,124	0,832	0,419	0,756	0,381
					C	0,111	1,285	0,392	1,168	0,356
					D	0,111	0,737	0,373	0,670	0,339
					E	0,112	0,923	0,392	0,839	0,357
Média						0,110	0,916	0,384	0,833	0,349

Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 9% - t 24h - S 180 kPa

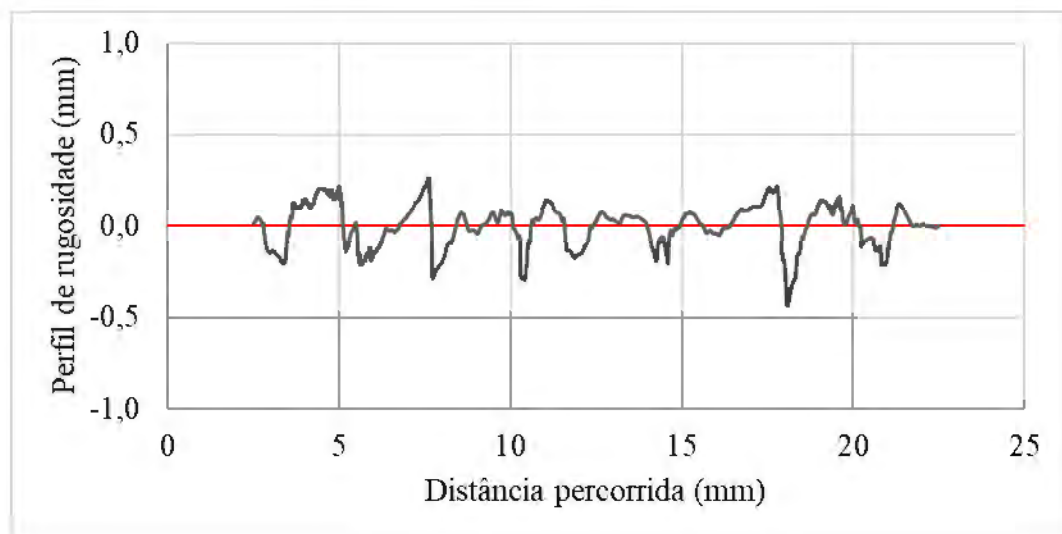
a)



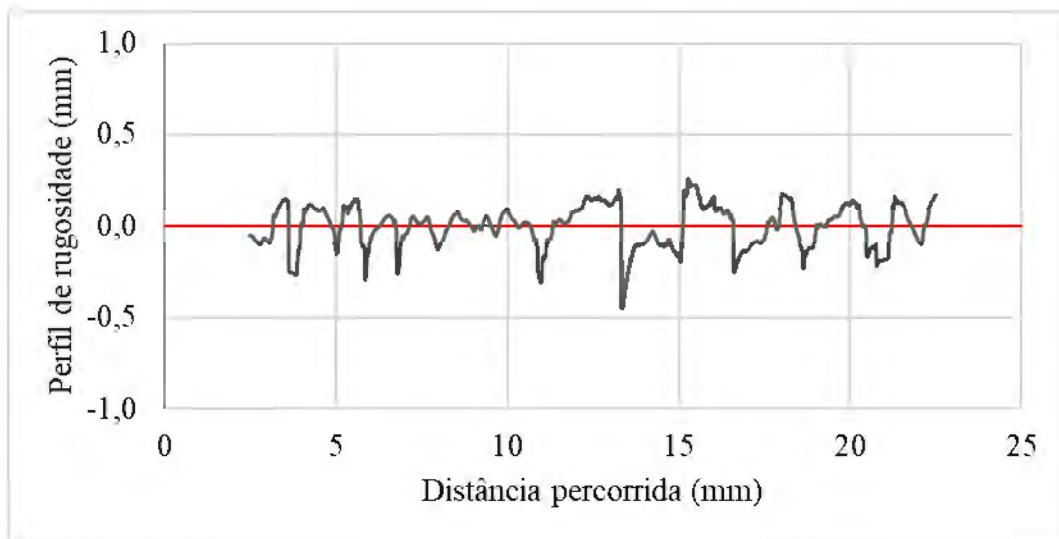
b)



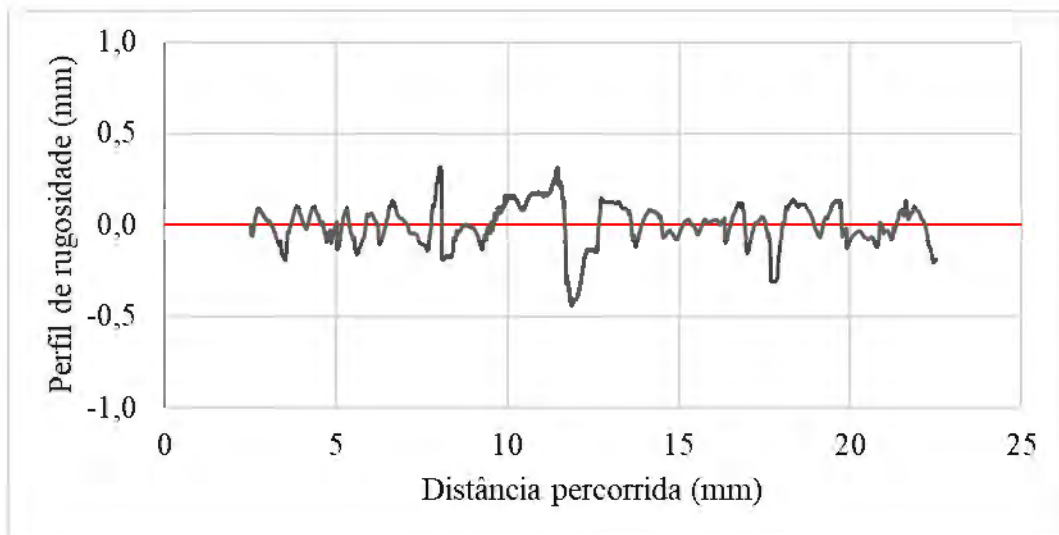
c)



d)



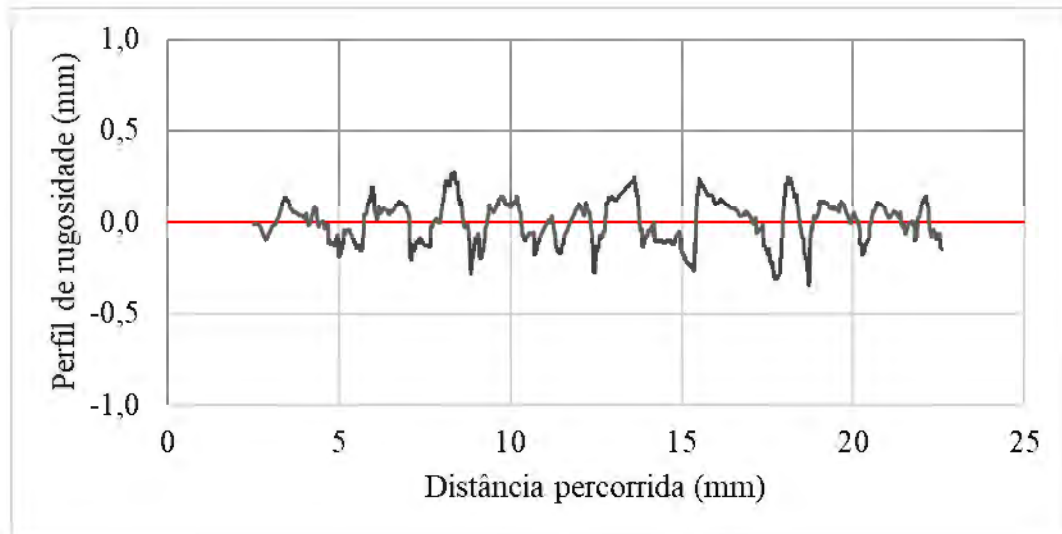
e)



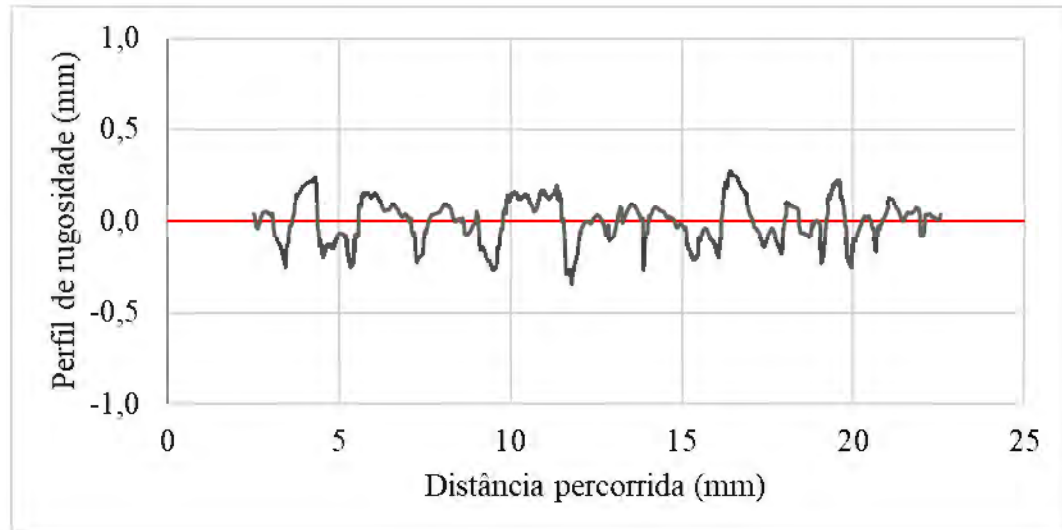
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
1,10	70	9	24	180	A	0,131	0,681	0,383	0,619	0,348
					B	0,078	0,943	0,274	0,857	0,249
					C	0,092	0,659	0,292	0,599	0,265
					D	0,093	0,659	0,318	0,599	0,289
					E	0,088	0,763	0,291	0,694	0,265
Média						0,096	0,741	0,311	0,674	0,283

Interface: D50 0,60 mm - DR 30% - w 3% - t 24h - S 100 kPa

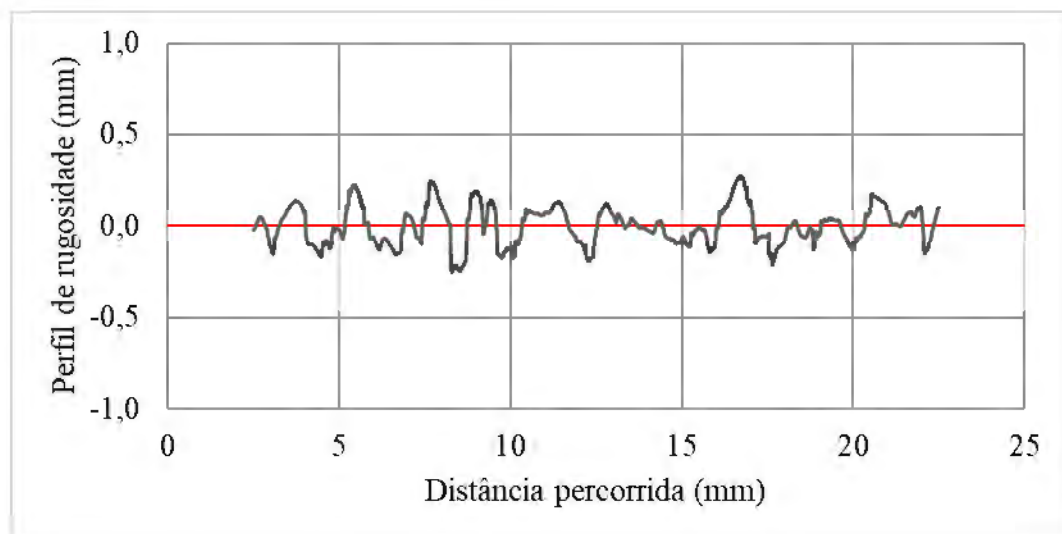
a)



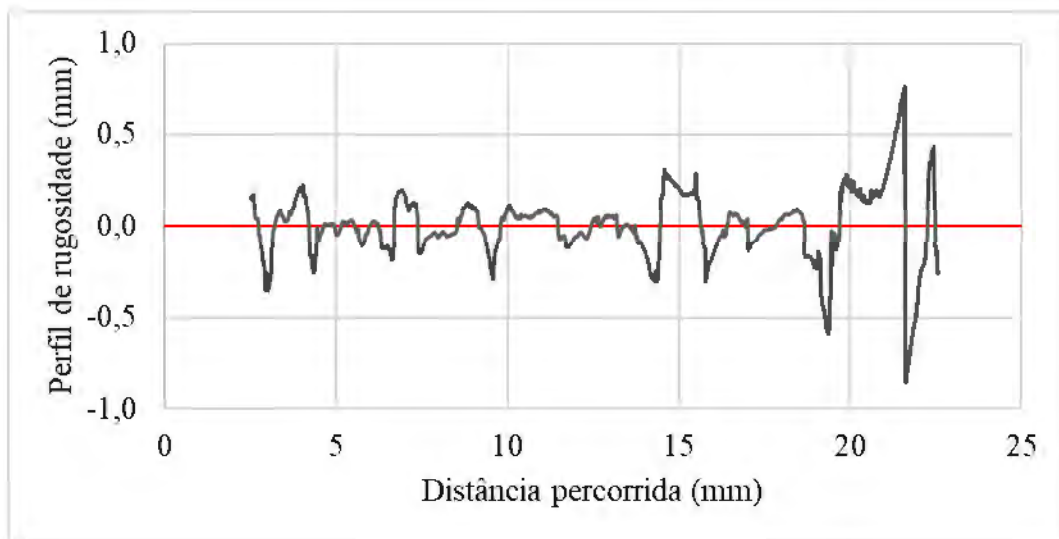
b)



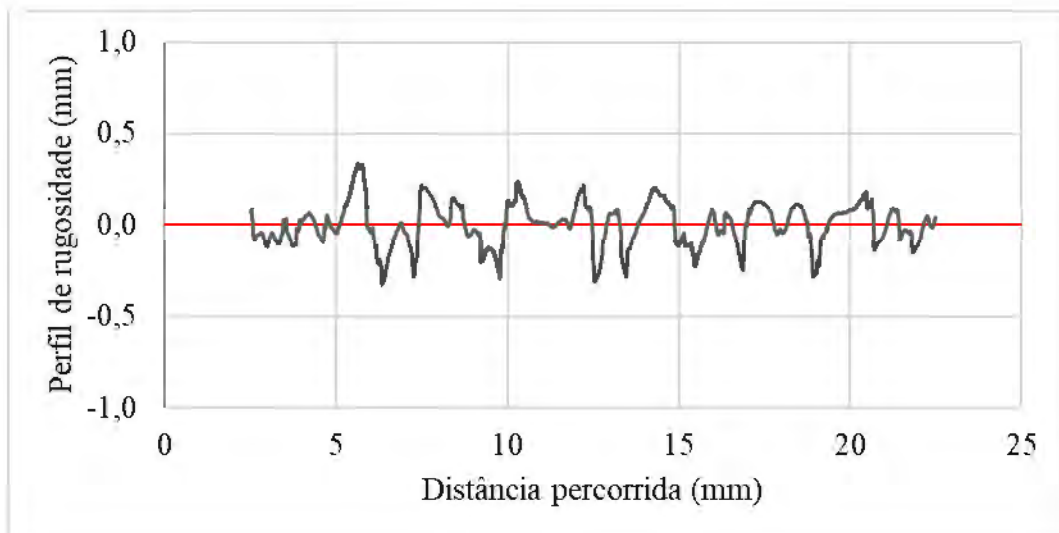
c)



d)



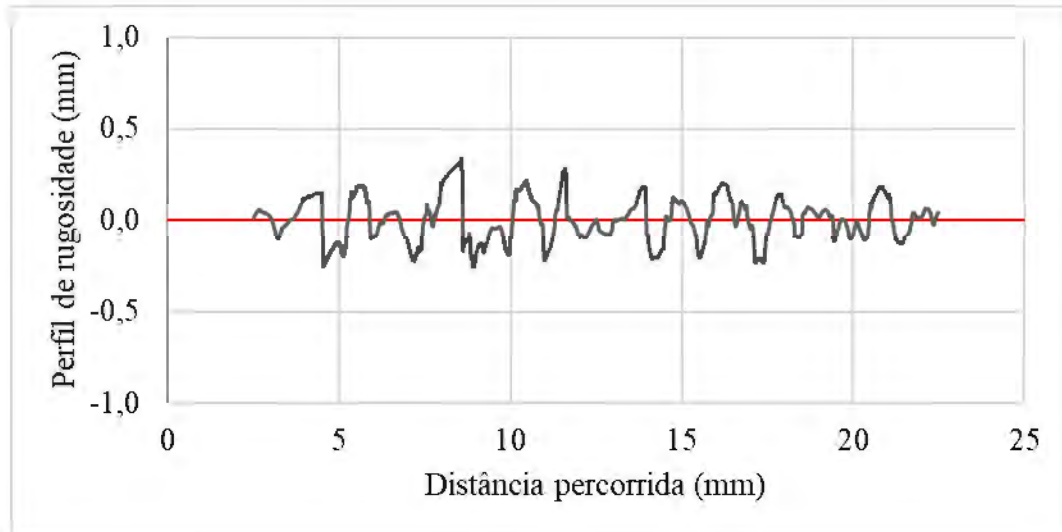
e)



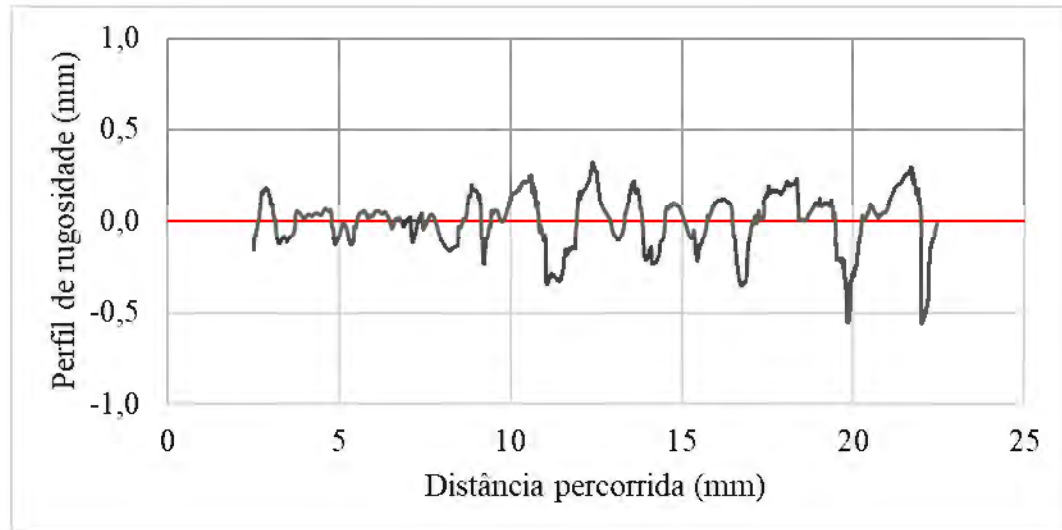
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	30	3	24	100	A	0,095	0,601	0,233	1,002	0,389
					B	0,096	0,555	0,237	0,925	0,396
					C	0,086	0,503	0,197	0,838	0,328
					D	0,130	1,635	0,294	2,725	0,490
					E	0,095	0,672	0,240	1,120	0,400
Média						0,100	0,793	0,240	1,322	0,400

Interface: D50 0,60 mm - DR 30% - w 9% - t 24h - S 100 kPa

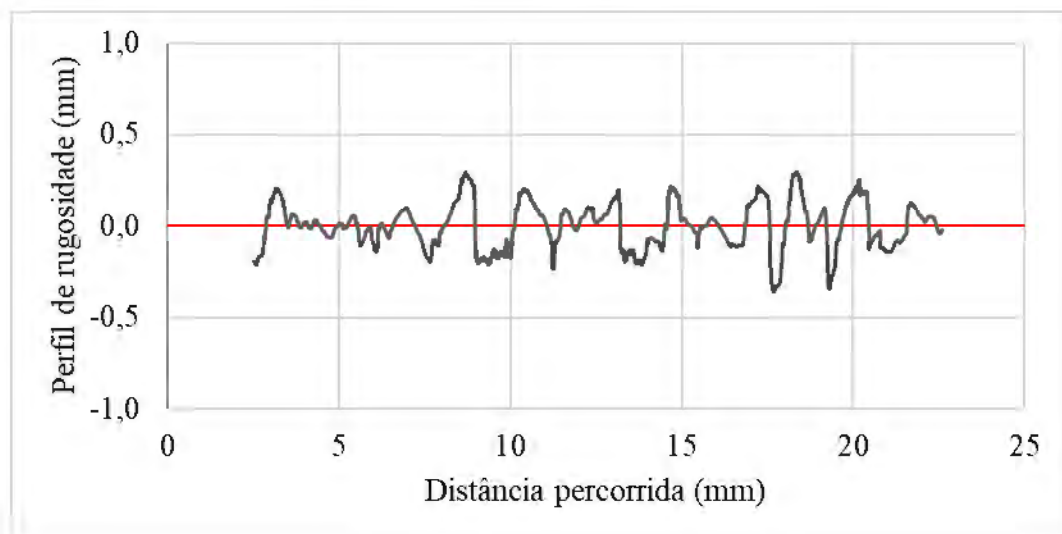
a)



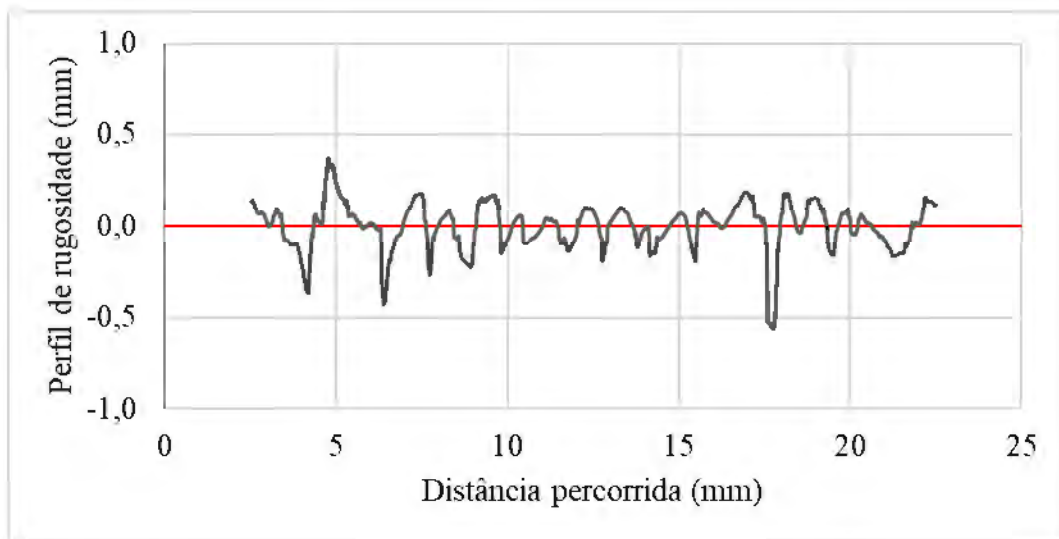
b)



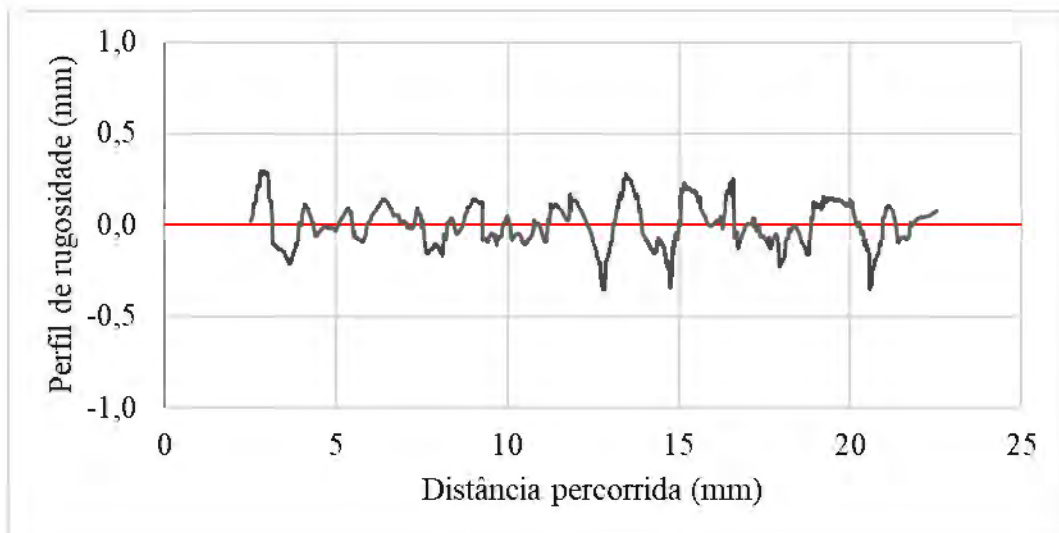
c)



d)



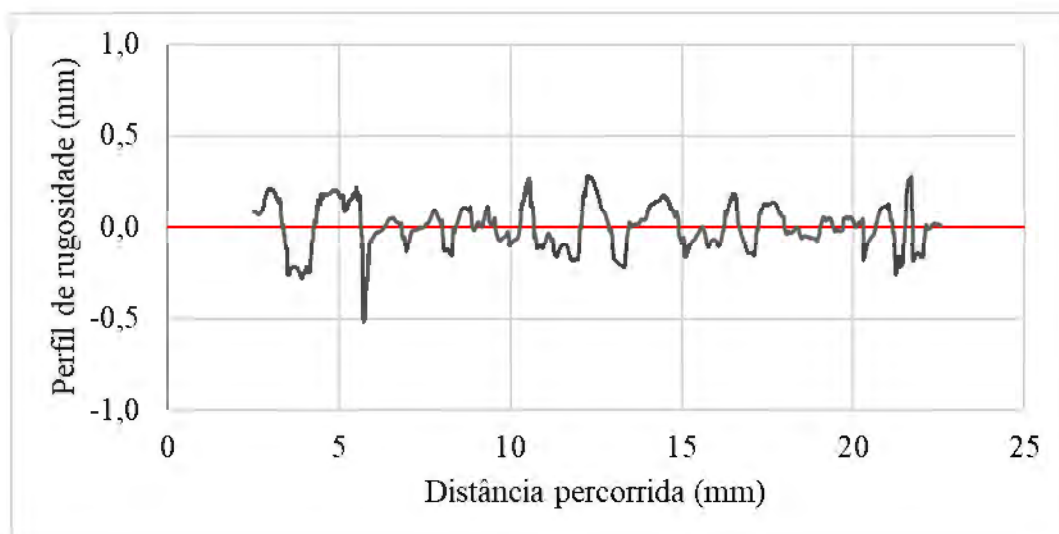
e)



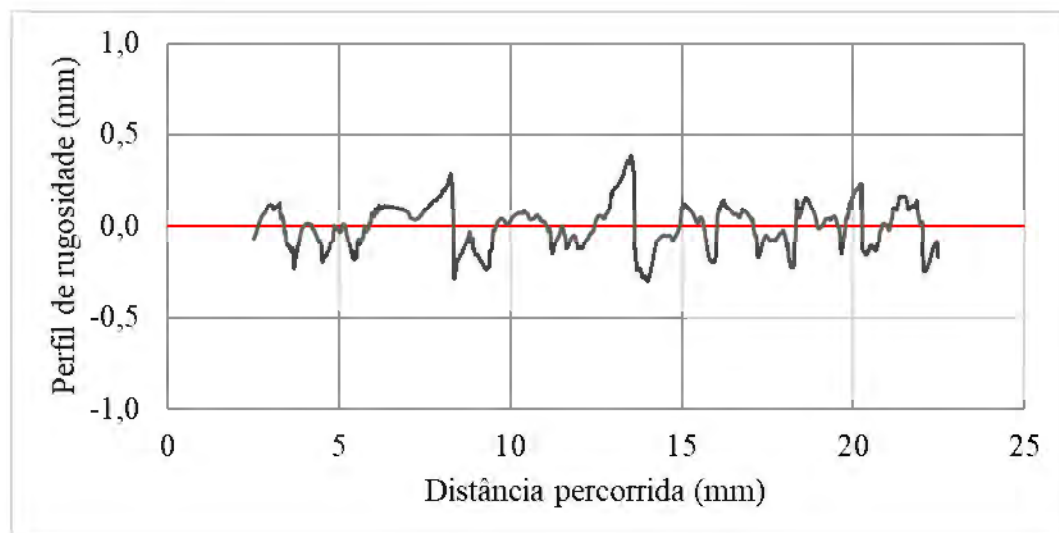
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	30	9	24	100	A	0,096	0,611	0,242	1,018	0,403
					B	0,117	0,863	0,260	1,438	0,434
					C	0,102	0,667	0,240	1,112	0,400
					D	0,095	0,747	0,245	1,245	0,408
					E	0,093	0,643	0,224	1,072	0,373
Média						0,101	0,706	0,242	1,177	0,404

Interface: D50 0,60 mm - DR 70% - w 3% - t 24h - S 100 kPa

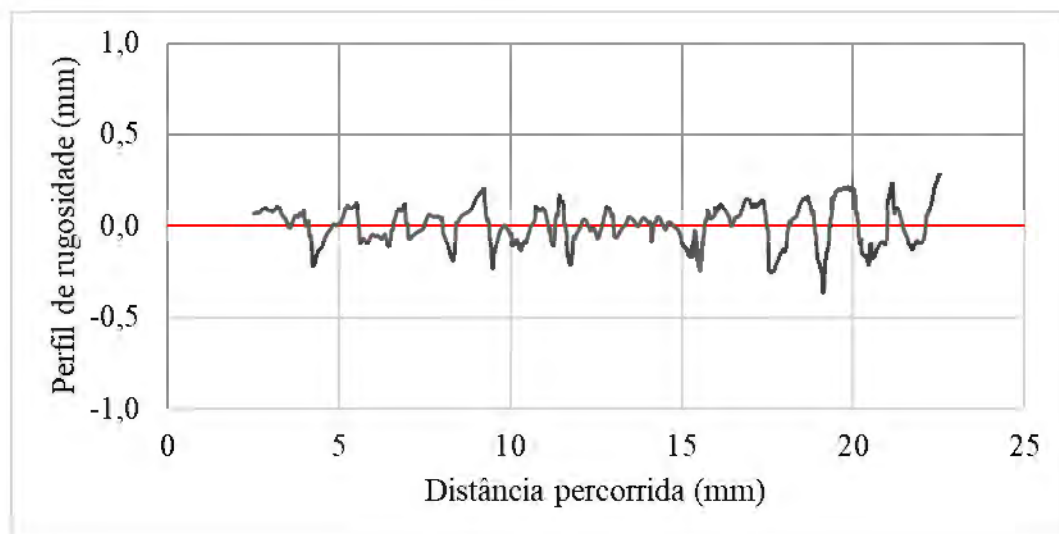
a)



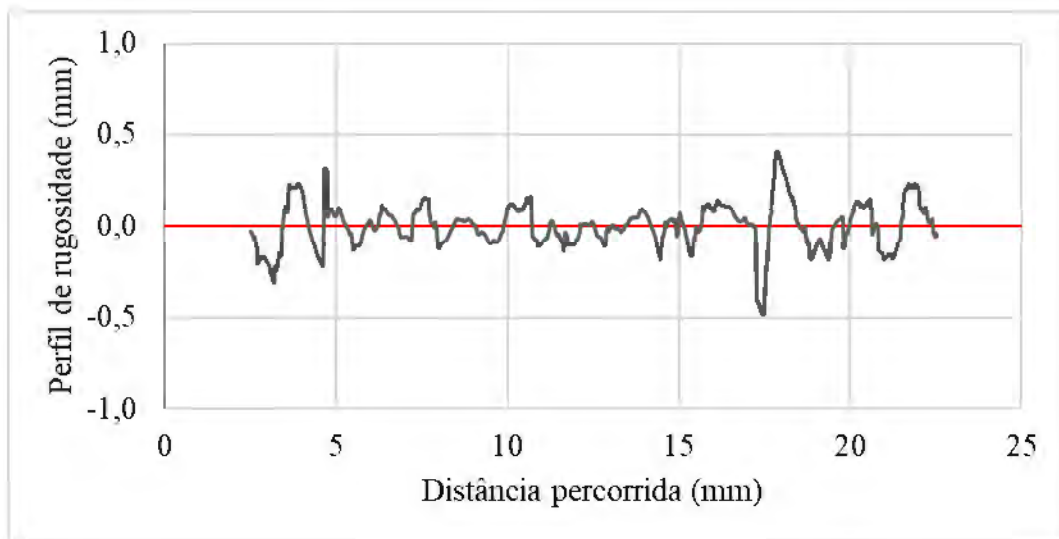
b)



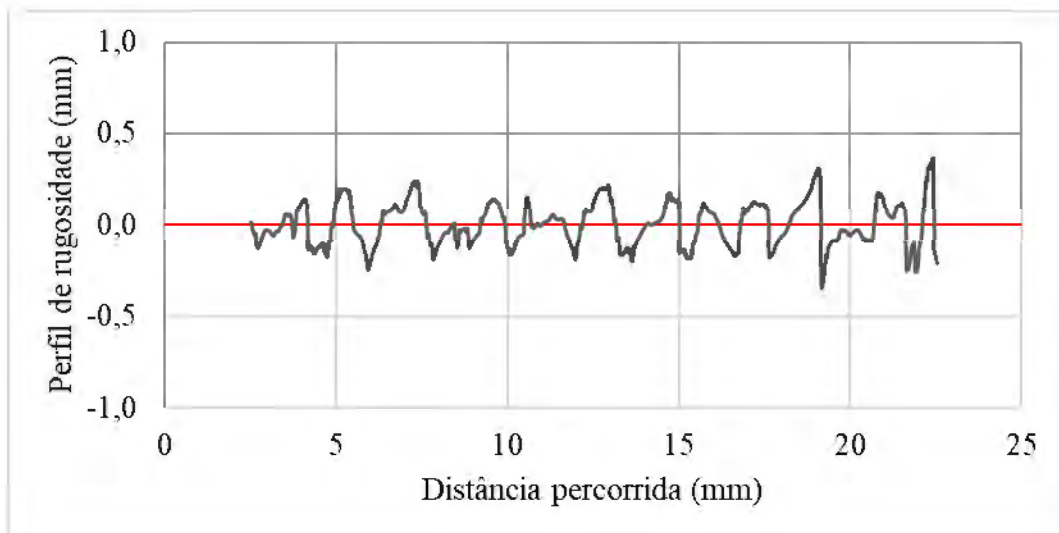
c)



d)



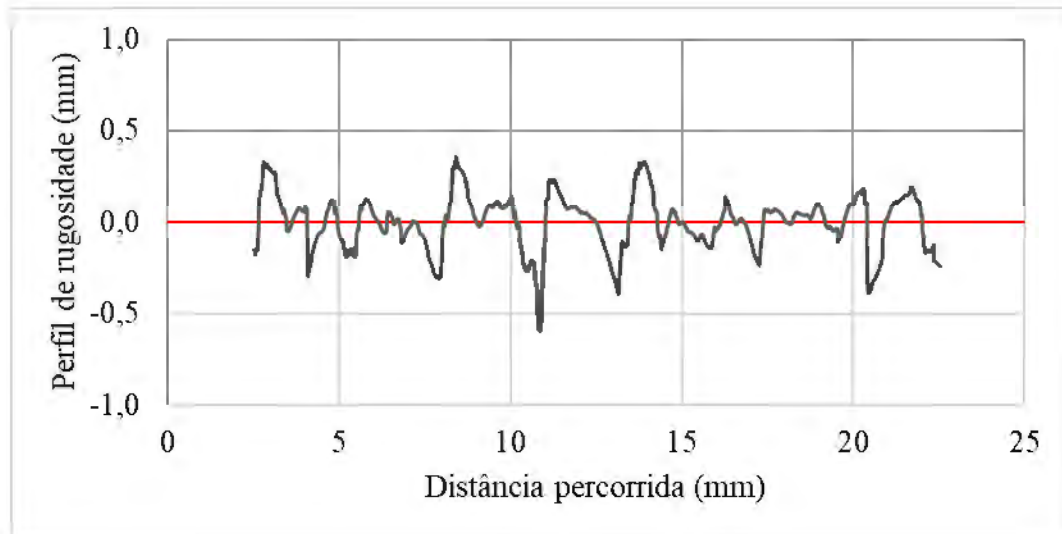
e)



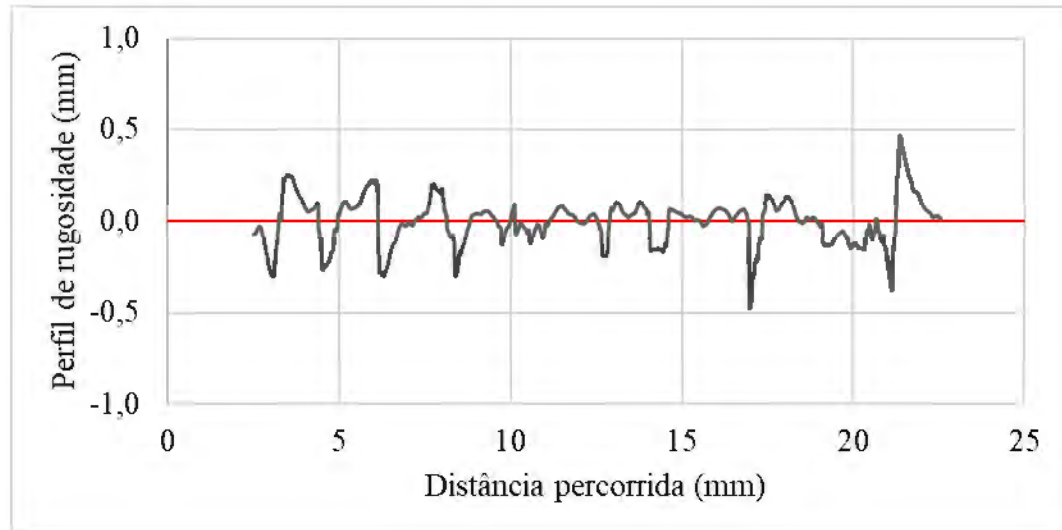
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
0,60	70	3	24	100	A	0,098	0,742	0,239	1,237	0,399
					B	0,100	0,696	0,216	1,160	0,359
					C	0,086	0,578	0,218	0,963	0,364
					D	0,093	0,764	0,231	1,273	0,385
					E	0,099	0,675	0,239	1,125	0,399
Média						0,095	0,691	0,229	1,152	0,381

Interface: D50 1,10 mm - DR 30% - w 3% - t 24h - S 100 kPa

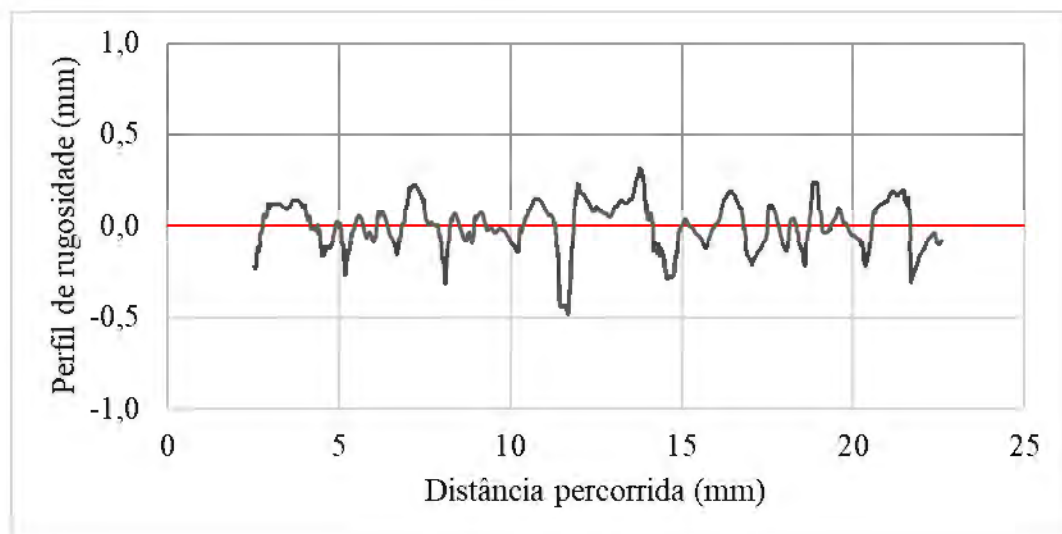
a)



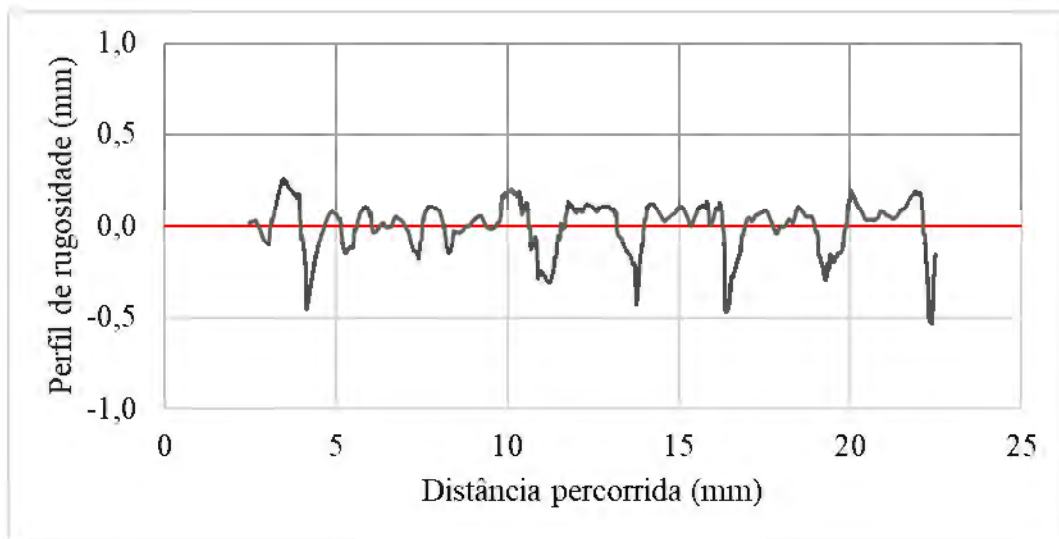
b)



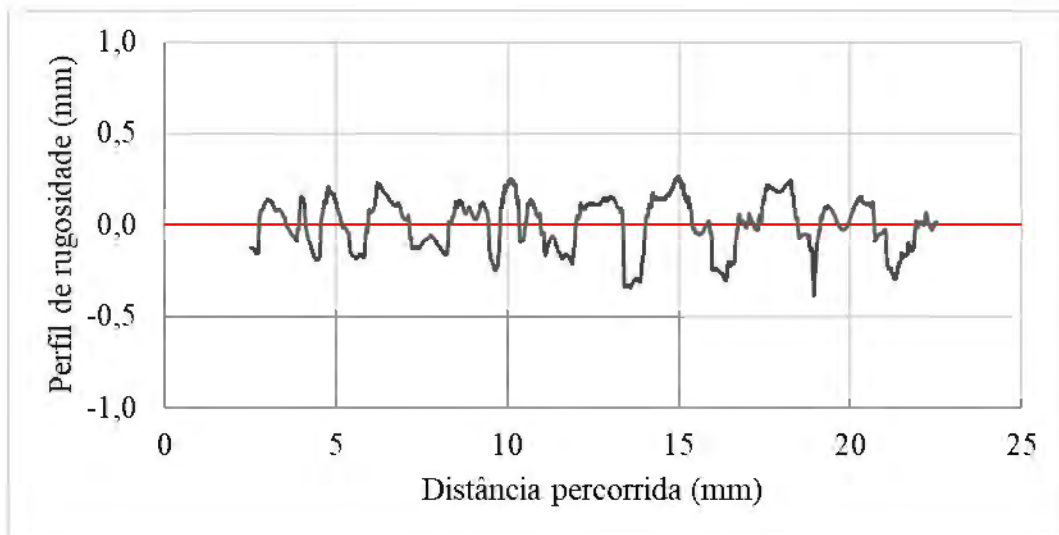
c)



d)



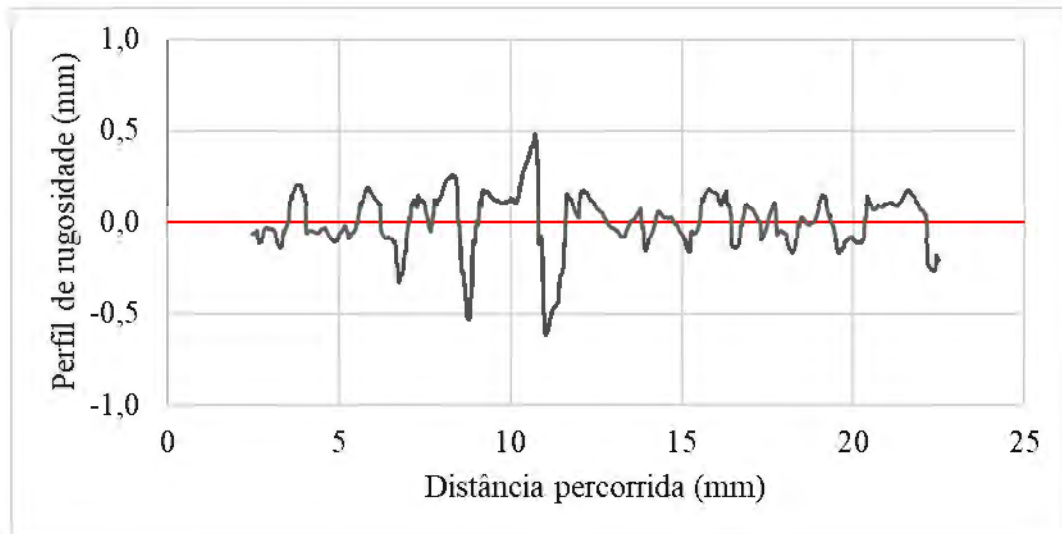
e)



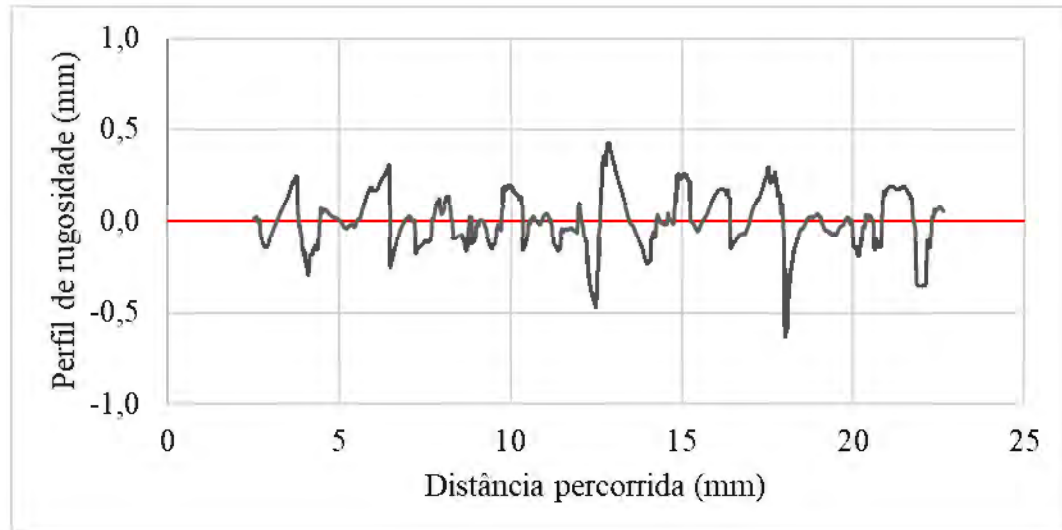
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
1,10	30	3	24	100	A	0,116	0,843	0,383	0,766	0,348
					B	0,096	0,865	0,330	0,786	0,300
					C	0,105	0,722	0,351	0,656	0,319
					D	0,103	0,730	0,322	0,664	0,293
					E	0,120	0,637	0,362	0,579	0,329
Média						0,108	0,759	0,350	0,690	0,318

Interface: D50 1,10 mm - DR 30% - w 9% - t 24h - S 100 kPa

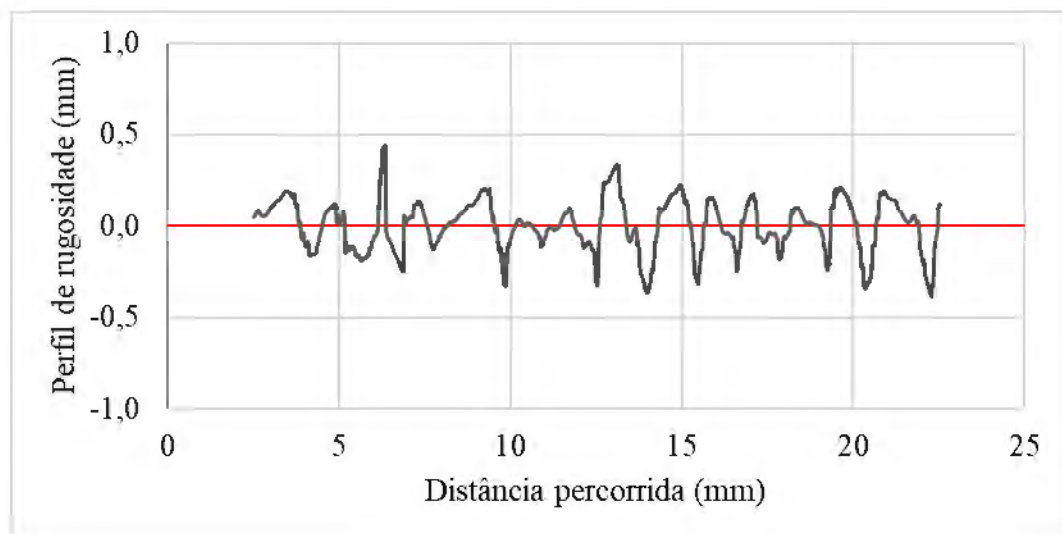
a)



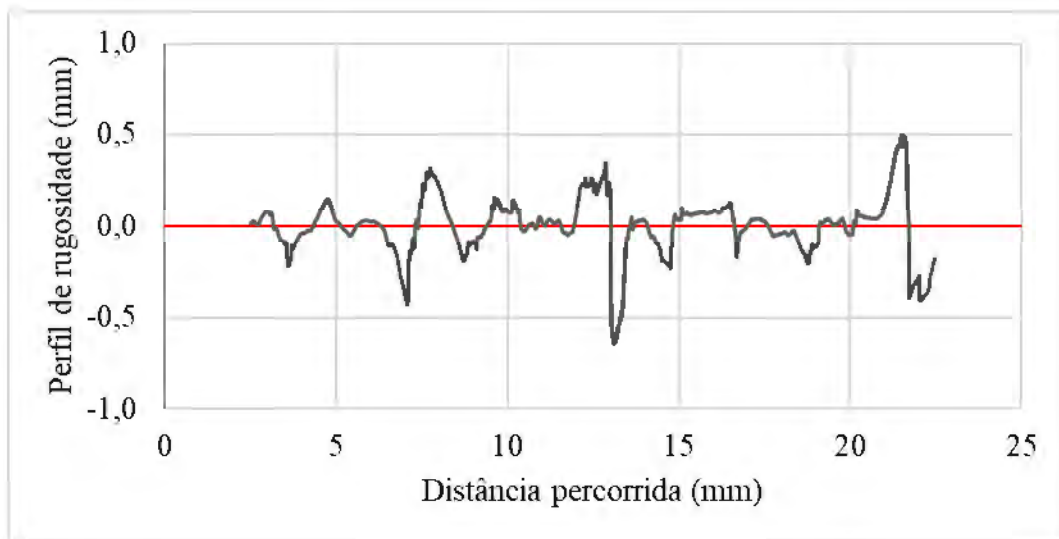
b)



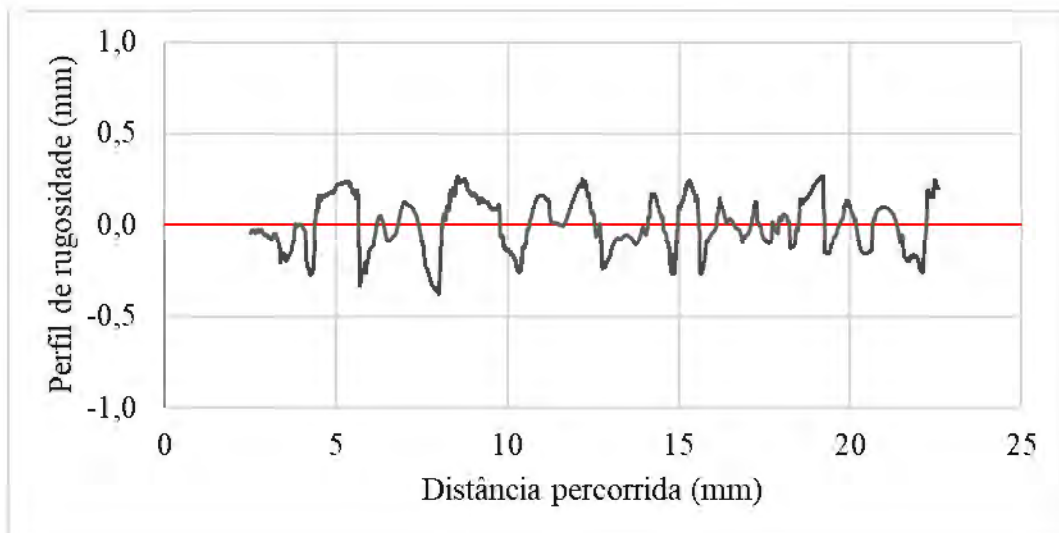
c)



d)



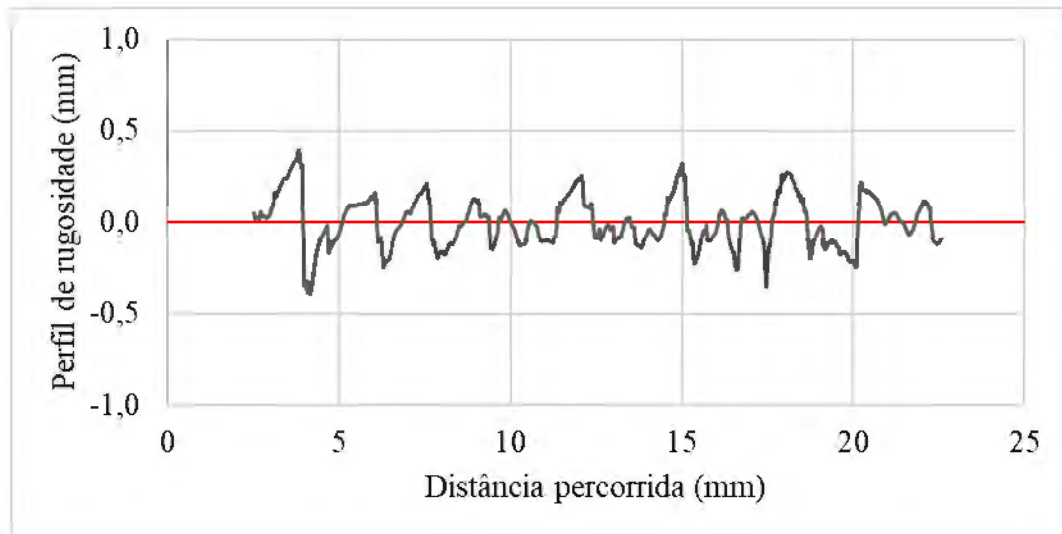
e)



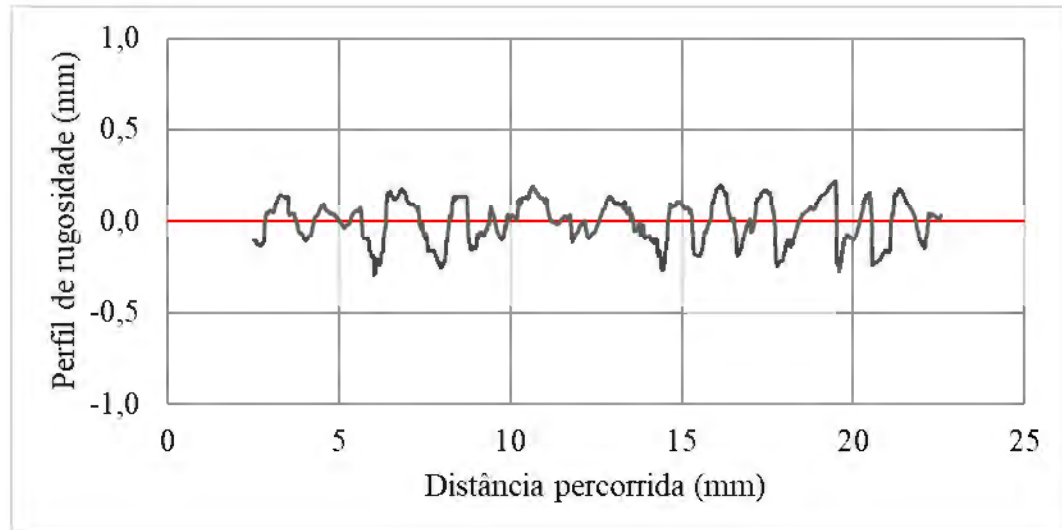
D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
1,10	30	9	24	100	A	0,117	1,102	0,371	1,002	0,337
					B	0,113	0,939	0,410	0,854	0,373
					C	0,116	0,716	0,414	0,651	0,376
					D	0,108	1,002	0,337	0,911	0,306
					E	0,118	0,648	0,365	0,589	0,332
Média						0,114	0,881	0,379	0,801	0,345

Interface: D50 1,10 mm - DR 70% - w 3% - t 24h - S 100 kPa

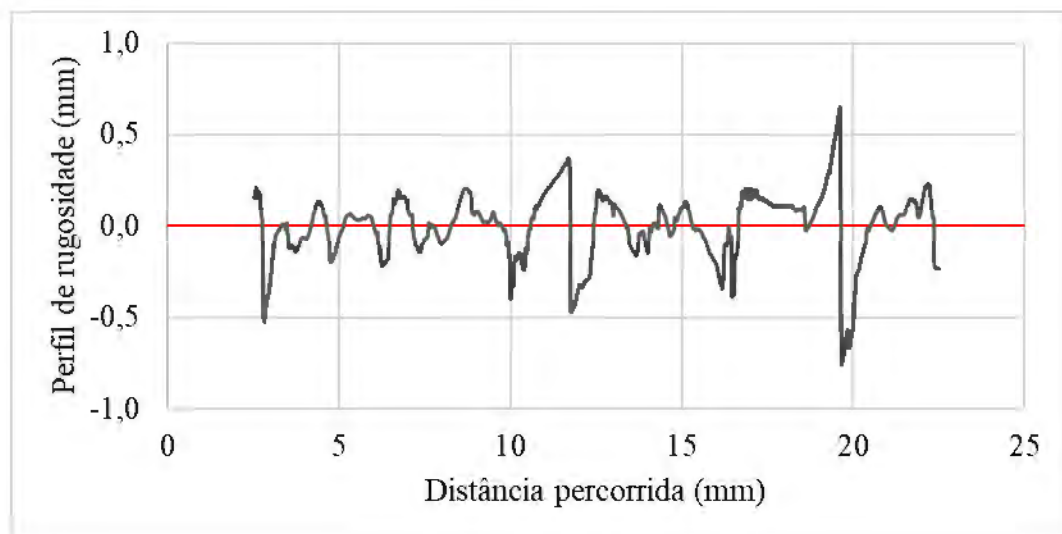
a)



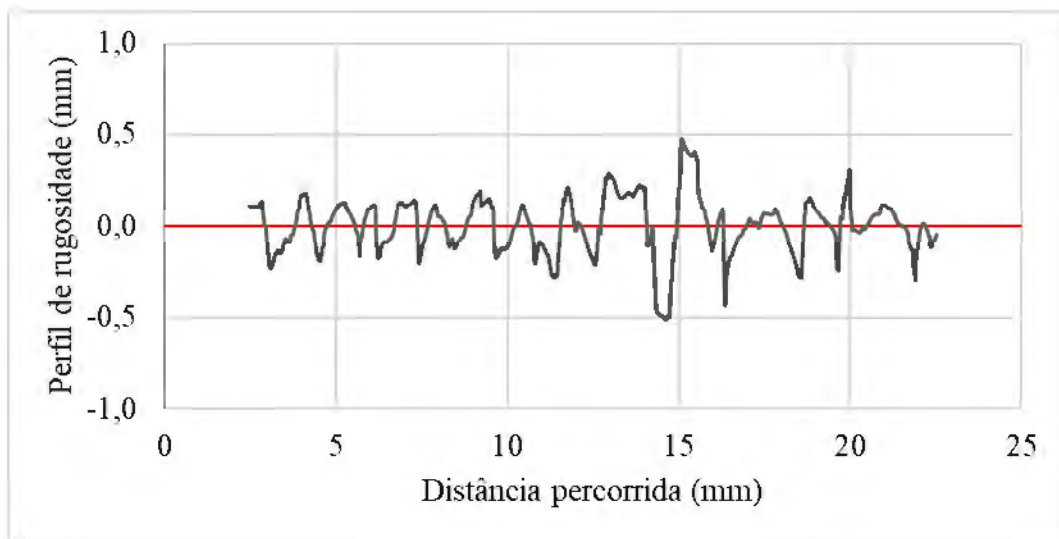
b)



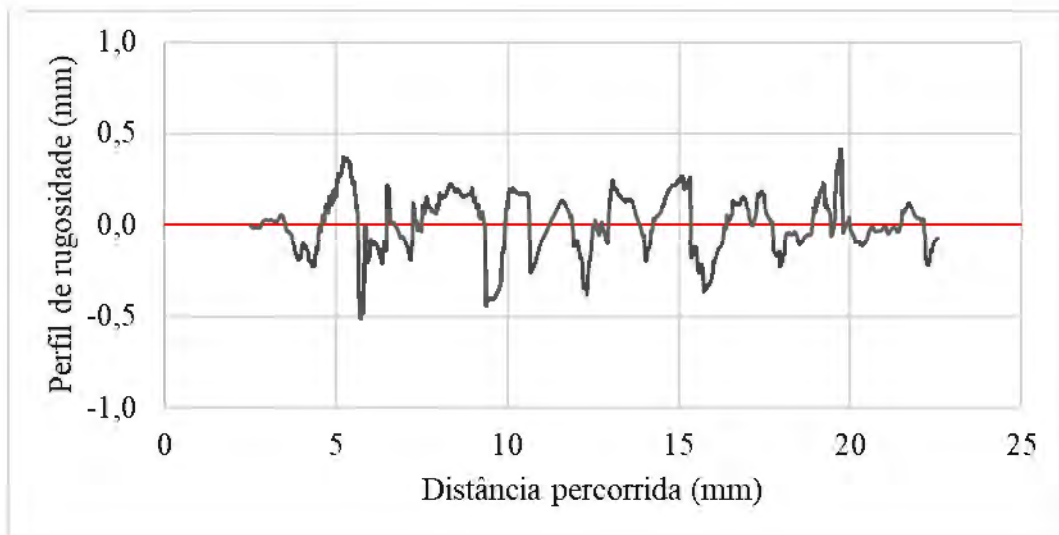
c)



d)



e)



D50 (mm)	DR (%)	w (%)	t (h)	S (kPa)	Posição	Ra (mm)	Rmax (mm)	R*max (mm)	Rn	R*n
1,10	70	3	24	100	A	0,109	0,788	0,360	0,716	0,327
					B	0,098	0,543	0,320	0,494	0,291
					C	0,137	1,414	0,437	1,285	0,397
					D	0,118	0,917	0,420	0,834	0,382
					E	0,127	0,892	0,433	0,811	0,393
Média						0,118	0,911	0,394	0,828	0,358