

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIAS**

NADINE MACHADO FICHER

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DUREZA EM CORPOS DE PROVA
DE CONCRETO**

**Alegrete
2022**

NADINE MACHADO FICHER

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DUREZA EM CORPOS DE PROVA
DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Luis Eduardo Kostaschi

**Alegrete
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

F445e Ficher, Nadine Machado

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DUREZA EM CORPOS DE
PROVA DE CONCRETO / Nadine Machado Ficher.

90 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2022.

"Orientação: Luis Eduardo Kostaski".

1. Concreto. 2. Distribuição Espacial. 3. Dureza. 4.
Modelos Estatísticos. 5. Material quase frágil. I. Título.

NADINE MACHADO FICHER

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DUREZA EM CORPOS DE PROVA DE CONCRET
O**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em 05 de outubro de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Eduardo Kosteski

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

UFRGS

Prof. Dr. Ederli Marangon

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/10/2022, às 14:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/10/2022, às 14:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ignacito Iturrioz, Usuário Externo**, em 06/10/2022, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0949650** e o código CRC **084EBA88**.

Dedico este trabalho aos meus pais, Tanira e Antônio, e aos meus avós, Constança e José Sirino.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me permitir chegar até aqui.

Ao meu orientador, professor Dr. Luis Eduardo Kostascki, por desempenhar seu trabalho de forma impecável e principalmente por toda a ajuda, apoio e incentivo ao longo da pós-graduação, sendo fundamental para que eu conseguisse finalizar este trabalho.

Aos meus colegas e amigos de pesquisa, que além de terem me auxiliado no desenvolvimento desse estudo, foram meus fiéis companheiros e se tornaram minha segunda família durante todo o curso. Nunca conseguirei pôr em palavras o que vocês, Camila Vargas Cardoso, Danielli Duó, Matthews Vargas, Kevin Dellatorre, Raquel Zydeck, Pedro Henrique Jucá, Gustavo Laionel e Karina Azzolin significam em minha vida, mas posso começar com um “Muito obrigada por tudo!”.

As minhas amigas e colegas de apartamento, Bruna Machado e Gabriele Barrilari, por todo o companheirismo, alegria e leveza que trouxeram para os meus dias desde o momento que nos conhecemos.

A minha família, por todo o amor, suporte e confiança dedicada a mim, que permitiu minha chegada ao final dessa caminhada.

Aos meus sogros, Ana e Paulo Zamin, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e incentivando, contribuindo imensamente para essa conquista.

Ao meu noivo, Carlos Eduardo Zamin, por todo amor, carinho, suporte, resiliência e paciência demonstrada durante toda minha trajetória acadêmica. Você é incrível, e foi essencial para que eu, enfim, concluísse mais essa jornada.

“O futuro pertence àqueles que acreditam na
beleza de seus sonhos”.

Eleanor Roosevelt

RESUMO

O estudo dos processos de formação e propagação de fissuras em materiais heterogêneos, de comportamento frágil ou quase frágil, como concreto, rochas e cerâmicas, por exemplo, é um tema constante investigação, devido ao comportamento mecânico complexo que esses materiais possuem. Por meio da mecânica computacional descontínua, as simulações numéricas possuem uma estrutura conveniente para representar a desordem da microestrutura que dos materiais heterogêneos, por meio de modelos estatísticos. No entanto, a resposta macroscópica desses modelos é altamente sensível no que diz respeito às formas, tamanhos e distribuição das propriedades dos elementos, destacando a necessidade de calibrar corretamente esses parâmetros, possibilitando assim que a formação e a interação entre os elementos fraturados sejam descritos de forma fiel ao encontrado experimentalmente. Este trabalho buscou investigar parâmetros estatísticos espaciais e não espaciais da dureza superficial de um concreto C50, avaliando a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado e do estado de tensões atuante nas amostras, sob a distribuição espacial das propriedades estudadas. A análise experimental foi feita através do ensaio de esclerometria, realizado “in grid” na superfície de corpos de prova de concreto, produzidos com agregado graúdo de diferentes granulometrias (dimensão máxima característica de 12,5 mm, 19 mm e 25 mm). Além disso, verificou-se a influência do estado de tensões ao qual uma estrutura está constantemente submetida nos valores de dureza, a investigação foi realizada nas superfícies de amostras cúbicas de C50 produzido com brita 1 (19 mm), submetidas a um estado inicial sem carregamento e com carregamento aplicado de 50%, 60% e 75% da tensão média de ruptura do material. Os resultados mostraram que a dimensão máxima característica do agregado graúdo não influenciou na resistência à compressão do concreto, e a distribuição de probabilidade do tipo Weibull forneceu o melhor ajuste de dados para ambas as dimensões de agregado graúdo, mas apresentando diferentes parâmetros de forma para a distribuição, de acordo com cada agregado. Os valores de índices esclerométricos sofreram influência do carregamento aplicado, com um aumento de 20% para tensões superiores a 50% do valor médio da tensão de ruptura do material. No entanto, a forma da distribuição e os parâmetros do semivariograma não se mostraram sensíveis com relação a direção e ao carregamento aplicado.

Palavras-Chave: Distribuição espacial, Modelos estatísticos, Material quase frágil, Propriedades heterogêneas, Concreto.

ABSTRACT

The study of crack formation and propagation processes in heterogeneous materials, with brittle or almost brittle behavior, such as concrete, rocks and ceramics, for example, is a constant subject of investigation, due to the complex mechanical behavior that these materials have. Through discontinuous computational mechanics, numerical simulations have a convenient structure to represent the disorder of the microstructure that of heterogeneous materials, through statistical models. However, the macroscopic response of these models is highly sensitive with regard to shapes, sizes and distribution of element properties, highlighting the need to correctly calibrate these parameters, thus enabling the formation and interaction between fractured elements to be described in a more accurate manner. true to what was found experimentally. This work sought to investigate spatial and non-spatial statistical parameters of the surface hardness of a C50 concrete, evaluating the influence of the maximum characteristic dimension of the coarse aggregate used and the state of stress acting on the samples, under the spatial distribution of the studied properties. The experimental analysis was carried out through the sclerometry test, carried out “in grid” on the surface of concrete specimens, produced with coarse aggregate of different granulometries (maximum characteristic dimension of 12.5 mm, 19 mm and 25 mm). In addition, the influence of the stress state to which a structure is constantly subjected to hardness values was verified, the investigation was carried out on the surfaces of cubic samples of C50 produced with crushed stone 1 (19 mm), subjected to an initial state without loading and with applied loading of 50%, 60% and 75% of the average tensile strength of the material. The results showed that the maximum characteristic dimension of the coarse aggregate did not influence the compressive strength of the concrete, and the Weibull-type probability distribution provided the best data fit for both dimensions of the coarse aggregate, but presenting different shape parameters for the distribution according to each household. The values of sclerometric indices were influenced by the load applied, with an increase of 20% for stresses greater than 50% of the average value of the material's breaking stress. However, the shape of the distribution and the parameters of the semivariogram were not sensitive in relation to the direction and the applied load.

Keywords: Spatial distribution, Statistical models, Quasi-brittle material; heterogeneous properties, Concrete.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2 Organização do Trabalho.....	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Tenacidade à Fratura.....	15
2.1.1 Teste de Indentação.....	16
2.1.2 Análise de Indentação para Materiais Heterogêneos	18
2.2 Distribuição das propriedades.....	21
2.2.1 Geoestatística	23
2.2.2 Semivariograma	24
2.2.2.1 Ajuste do Semivariograma Teórico.....	25
3 METODOLOGIA.....	28
3.1 Materiais	28
3.1.1 Aglomerante.....	29
3.1.2 Agregados	29
3.1.4 Aditivo	31
3.2 Produção das Amostras.....	31
3.3 Ensaio Mecânicos.....	32
3.3.1 Ensaio de Compressão Axial	32
3.3.2 Ensaio de Esclerometria.....	33
3.3.2.1 Correlação com a resistência à compressão	34
3.3.2.1 Ensaio de Esclerometria nos Placas de Concreto	35
3.3.2.2 Ensaio de Esclerometria sob Tensão de Compressão	36
3.4 Processamento dos Dados.....	37
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.1 Resistência à compressão.....	38
4.2 Placas de concreto.....	40
4.2.1 Brita 1	40
4.2.2 Brita 0 e 2	46
4.2.3 Comparação dos Resultados	53

4.3 Cubos de concreto.....	58
4.3.1 Comparação entre medidas de cubo e placas	59
4.3.2 Direção do Lançamento	61
4.3.3 Influência da tensão.....	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A – DADOS DE ÍNDICES ESCLEROMÉTRICOS	81

1 INTRODUÇÃO

A Mecânica da Fratura é a área da engenharia dedicada ao estudo dos processos de formação e propagação de fissuras, trincas e outros defeitos responsáveis pela perda de resistência dos materiais e possíveis causas das falhas de elementos estruturais (ANDERSON, 2005; CALLISTER, 2008).

Ao longo do tempo, o desenvolvimento de modelos matemáticos e métodos numéricos, voltados para a mecânica da fratura possibilitaram que o uso de softwares fossem capazes de simular os fenômenos de fratura em componentes estruturais, mas segundo Rocha (1989), a simulação da fratura ou fragmentação em materiais frágeis ou quase frágeis é um tema complexo, que sofre com restrições e problemas específicos em diferentes situações, o que dificulta na criação de uma solução geral da ruptura. No caso de materiais como o concreto, rochas e cerâmicas, por exemplo, é necessário um aperfeiçoamento dos modelos matemáticos que permitir representar a heterogeneidade característica das propriedades mecânicas desses materiais.

Os métodos dos elementos finitos (MEF) e de elementos de contorno (MEC) são bem desenvolvidos no campo da mecânica da fratura e dano, embora só abranjam campos contínuos ou que a um certo nível de observação possam ser considerados um meio contínuo e, portanto, a modelagem da nucleação e propagação das fissuras nesses métodos pode ser uma tarefa complicada.

Com o avanço da mecânica computacional descontínua, que tem como exemplo o método dos elementos discretos (DEM), tornou-se possível a simulação da formação de fraturas e a própria interação entre elementos fraturados com maior facilidade. Mas além disso, os métodos discretos possuem uma estrutura conveniente para dar conta da desordem da microestrutura dos materiais heterogêneos por meio de modelos estatísticos, caracterizando as propriedades mecânicas através da interpolação de campos aleatórios 3D definidos, além do tipo de distribuição, por sua média, coeficiente de variação ou desvio padrão e o comprimento de correlação entre os dados. Esse recurso representa uma vantagem em relação aos modelos tradicionais de abordagem contínua que adotam técnicas de homogeneização para converter um material desordenado em um modelo contínuo equivalente.

Jenabidehkordi (2019), afirma que nos métodos discretos a resposta macroscópica é altamente sensível no que diz respeito às formas, tamanhos e distribuição das propriedades dos elementos, bem como a leis de contato entre eles, destacando que calibrar esses parâmetros de

maneira confiável e fiel é o caminho para descrever o comportamento futuro dos elementos estruturais de maneira mais precisa.

Dessa forma, este trabalho propõem-se a avaliar estatisticamente a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto por meio de ensaios de compressão axial, estudar a variabilidade espacial da dureza superficial do concreto e determinar o comprimento de correlação das propriedades, por meio de ensaios de esclerometria realizados “*in grade*” e de ferramentas de análise estatística espacial. E, além disso, determinar qual a influência que o estado de tensões tem sobre os resultados obtidos, avaliando as amostras em um estado inicial sem carregamento e também em estados com carregamento aplicado de 50%, 60% e 75% da tensão média de ruptura do concreto estudado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar os parâmetros estatísticos da resistência à compressão e da dureza superficial, bem como a distribuição espacial das propriedades do concreto C50, com variação na dimensão máxima característica do agregado graúdo e também a influência de diferentes estados de tensão de compressão.

1.1.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos do trabalho podemos citar:

- Avaliar a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto C50;
- Analisar a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo nos parâmetros estatísticos, espaciais e não espaciais, da dureza superficial;
- Determinar o comprimento de correlação do material através da análise estatística espacial;
- Avaliar a distribuição espacial da dureza superficial e, conseqüentemente, seus parâmetros estatísticos quando o corpo é submetido a um estado uniaxial de tensões de compressão.

1.2 Organização do Trabalho

A elaboração do trabalho é dividida em 5 capítulos principais:

1. O capítulo 1 é destinado a apresentação do tema de pesquisa, considerações gerais e objetivos do trabalho;
2. O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica e a fundamentação teórica necessária para a compreensão dos conceitos que fundamentam essa pesquisa, bem como as informações sobre o atual estado da arte;
3. O capítulo 3 aborda a metodologia empregada para a realização da pesquisa;
4. O capítulo 4 é destinado a análise e a discussão dos resultados;
5. O capítulo 5 refere-se as conclusões obtidas e as recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo é destinado à contextualização do tema estudado, abordando os principais pontos do trabalho para a melhor compreensão dos problemas de pesquisa e do atual estado da arte. O primeiro capítulo aborda a tenacidade à fratura e os testes de indentação, parâmetro e métodos importantes para a simulação do campo aleatório dos materiais frágeis. Na sequência, são apresentados estudos onde o caráter aleatório das propriedades heterogêneas é considerado no comportamento do material e a forma como cada autor utilizou para implementar a aleatoriedade das propriedades em suas análises. Por fim, os termos e definições da geoestatística são descritos, visando o esclarecimento sobre o método de análise espacial das propriedades e como esse ramo da estatística e as suas ferramentas de análise podem ser utilizadas para compreender a distribuição da dureza superficial em superfícies de concreto.

2.1 Tenacidade à Fratura

A tenacidade é uma propriedade muito importante do aspecto da mecânica da fratura, uma vez que descreve a capacidade do material de absorver energia e de se deformar plasticamente antes de atingir a ruptura (CALLISTER, 2008), sendo um dos principais parâmetros utilizados para caracterizar as propriedades aleatórias dos materiais heterogêneos, como pode ser visto detalhadamente nos trabalhos de Cabral *et al.* (2019), Friedrich, Da Silva e Iturrioz (2019), Puglia *et al.* (2010), Puglia *et al.* (2019), Rädels *et al.* (2017), por exemplo.

Os métodos de avaliação da tenacidade são bem definidos e padronizados, mas quando se trata de materiais frágeis os métodos convencionais muitas vezes se tornam inviáveis, devido à dificuldade de execução do ensaio em amostras de grande fragilidade ou pela da necessidade de equipamentos muito caros (RICKHEY *et al.*, 2015). Nessas situações, os testes de indentação surgem como uma alternativa de avaliar as propriedades mecânicas do material. Segundo Čorić, Renjo e Čurković (2017) as cerâmicas e os vidros são exemplos dos principais materiais frágeis que empregam o método de indentação para a determinação da tenacidade a fratura e outras propriedades mecânicas. Čorić, Renjo e Čurković (2017) explica que a preferência ocorre especialmente porque a técnica permite que uma grande quantidade de leituras seja realizada em pequenas amostras do material.

O método de fratura por indentação é baseado em testes de dureza padronizados, onde as propriedades medidas durante o ensaio geralmente são a dureza e o módulo de elasticidade, que permitem correlacionar os dados através de formulações matemáticas com outras diferentes

propriedades mecânicas do material, como a tenacidade e tensão residual (RANGEL, 2011; FISCHER-CRISP, 2011). A possibilidade de obter diversas propriedades mecânicas em pequenos volumes de material através do teste de indentação, de forma simples, barata, rápida e com a mínima necessidade de preparação das amostras, tornou a técnica de indentação uma alternativa potencial e promissora dentro do estudo dos materiais frágeis (RICKHEY *et al.*, 2015).

A metodologia tem sido utilizada por muitos autores que buscam caracterizar as propriedades de materiais frágeis como o trabalho de Liu, Ostadhassan e Bubach (2016) e Su, Chen e Ma (2019) que utilizam a nanoindentação e microindentação, respectivamente, na determinação da tenacidade à fratura de amostras de xisto bem como na caracterização das composições mineralógicas e microestruturais da rocha; Moradkhani e Baharvandi (2017) por meio da indentação de Vickers, avaliou os efeitos de aditivos no módulo de elasticidade, microdureza e tenacidade de um nanocompósito de carboneto de boro (B₄C); Ma *et al.*, (2017) avaliou a tenacidade à fratura de da sílica fundida a partir de um indentador Berkovich, assim como Miyazaki e Yoshizawa (2017) e Abbas, Khalid e Zaigham (2016) também utilizaram o método de indentação aplicado a materiais cerâmicos e também Marimuthu *et al.* (2017) utilizou o método de indentação esférica através da utilização de um indentador de cone para avaliar a tenacidade a fratura do vidro.

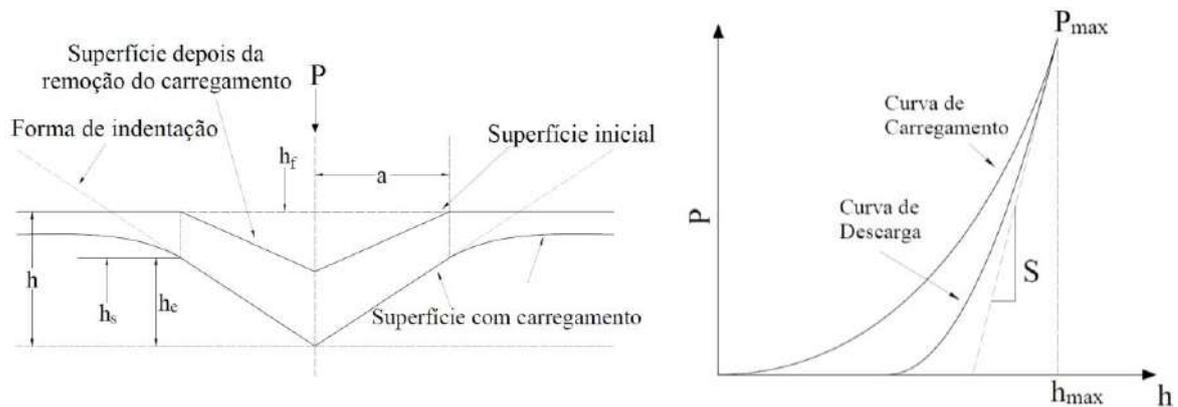
2.1.1 Teste de Indentação

O teste de indentação consiste em avaliar o material através de uma pequena impressão feita na superfície, por meio de um indentador carregado com uma carga P . A aplicação da carga resulta em uma profundidade de penetração h , conforme a Figura 1- (a). Durante o ensaio a carga e a profundidade são registadas ao longo do tempo, estabelecendo assim a relação carga-deslocamento, como ilustrado na Figura 1- (b) (MALZBENDER *et al.*, 2002).

O experimento consiste em uma única aplicação da carga máxima P , que é mantida por alguns segundos e depois retirada lentamente até a descarga completa (PELISSER; GLEIZE; MIKOWSKI, 2009; MALZBENDER *et al.*, 2002). Durante o carregamento, o material imediatamente abaixo do penetrador rígido sofre uma deformação elastoplástica, enquanto o material mais longe da zona de contato se deforma elasticamente. Assim, uma parte da energia que é fornecida ao sistema ou é armazenada em deformação elástica ou dissipada por deformação plástica no material abaixo do penetrador e ao longo de superfícies de descontinuidade. Durante este processo de descarga, a energia elástica é recuperada e a rigidez

de contato fornece uma medida da resposta elástica do material (CONSTANTINIDES *et al.*, 2006).

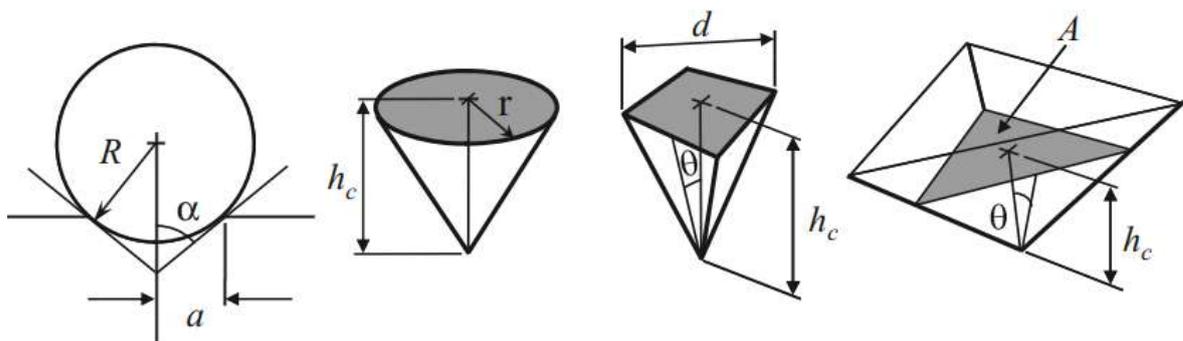
Figura 1 - Representação esquemática da aplicação do teste de indentação na superfície de um material



Fonte: Adaptado de Malzbender *et al.* (2002, p. 49)

Existe uma grande variedade de indentadores disponíveis comercialmente, que acomodam diferentes tamanhos, formas e geometrias de indentação, como os exemplos da Figura 2. A versatilidade do mecanismo de ensaio permite a caracterização de propriedades mecânicas elásticas e plásticas dos materiais em diferentes escalas de comprimento, em especial nas escalas que os testes tradicionais são inviáveis (CONSTANTINIDES, 2003).

Figura 2 - Tipos de indentadores (a) esfera; (b) cone; (c) Vickers e (d) Berkovich



Fonte: Adaptado de Fischer-Crips (2011, p.23).

Os testes de indentação são geralmente os preferidos para caracterização das propriedades mecânicas de materiais com pequenos volumes como filmes finos, revestimentos finos, tratamentos de superfícies ou materiais compósitos devido a disponibilidade de indentadores afiados que fornecem um meio conveniente e não destrutivo de medir as

propriedades, permitindo avaliação até em nanoescalas de comprimento (CONSTANTINIDES; ULM; VAN VLIET, 2003; HORNYAK *et al.*, 2009; FISCHER-CRIPS, 2011).

2.1.2 Análise de Indentação para Materiais Heterogêneos

Segundo Constantinides *et al.* (2006) e Constantinides e Ulm (2007), quando se trata de materiais compósitos é importante realizar a análise estatística dos dados de indentação obtidos através de um grande número de experimentos, os resultados das propriedades mecânicas obtidas devem ser analisados por meio da distribuição de histogramas ou diagramas de frequência. O experimento de Gedanken possui os elementos necessários para a análise estatística de centenas de testes de indentação, mediante distribuição espacial controlada entre as indentações com espaçamentos regulares de matrizes, sugerindo que os testes de indentação em materiais heterogêneos sejam realizados ao longo de matrizes ou grades.

Considerando um material constituído por duas fases com diferentes propriedades mecânicas, caracterizado por uma escada de comprimento D , em que a profundidade máxima de indentação ($h_{máx}$) é muito menor que a escala de comprimento do material, $h_{máx} \ll D$, então um único teste de indentação realizado na superfície do material, dará acesso as propriedades mecânicas de apenas a uma das fases constituintes do material. Entretanto quando um grande número de testes é realizado ao longo de uma grade formada por espaçamentos maiores que o tamanho característico da impressão do indentador (evitando a interferência entre os testes individuais), e o tamanho da matriz é suficiente para evitar viés estatístico em relação à distribuição espacial das duas fases, a probabilidade de encontrar uma ou outra fase é igual à fração superficial ocupada pelas duas fases na superfície de indentação. Ou seja, um grande número testes de indentação não apenas dão acesso as propriedades médias do material no comprimento escala, mas também tem o potencial de dar acesso as frações de volume, como mostram a Equação (1) e Equação (2).

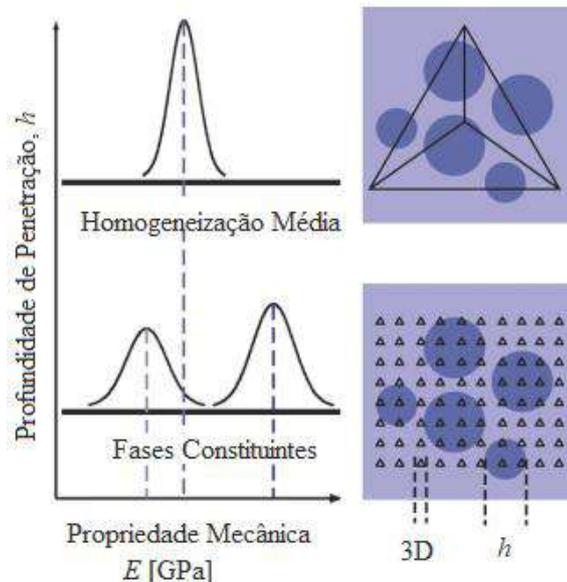
$$f_j = \frac{N_j}{N} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n N_j = N \quad (2)$$

Onde N_j é o número de indentações encontradas na fase “ j ” do material, identificada pela diferença entre as propriedades do material; f_j é, portanto, a fração do volume do material que corresponde fase “ j ”.

Na Figura 3 é possível compreender melhor o princípio do experimento de Gedanken. Nota-se que as maiores profundidades de indentação fornecem acesso às propriedades do material compósito homogeneizado, enquanto pequenas profundidades de indentação oferecem acesso às propriedades na fase mecânica.

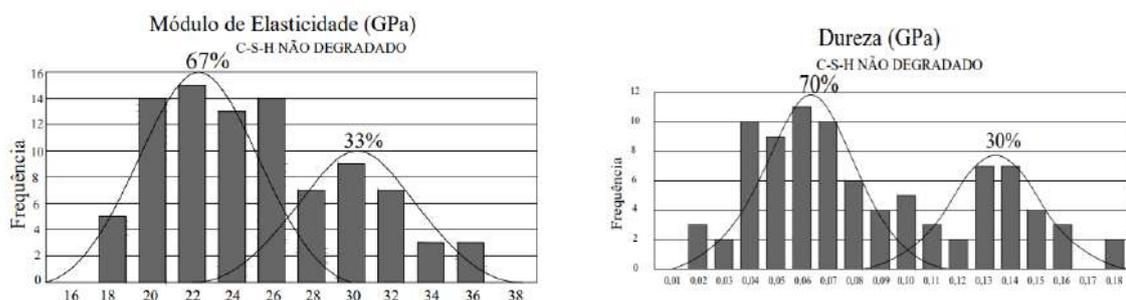
Figura 3 - Análise estatística da indentação em malha para materiais

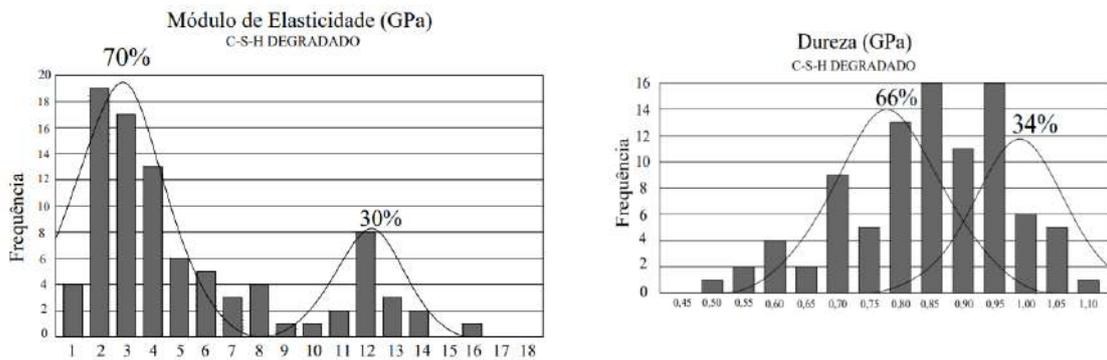


Fonte: Adaptado de Constantinides e Ulm (2007, p. 68)

Constantinides, Ulm e Van Vliet (2003) utilizando um indentador NanoTest 200 Berkovich, realizou 200 testes de indentação distribuídos em uma malha retangular com área de $1000\mu\text{m}^2$ sobre uma matriz cimentícia, com o intuito de avaliar as propriedades da matriz antes e após o processo de lixiviação. Os resultados apresentados em histograma, exibidos na Figura 4, permitiram identificar o comportamento bimodal das propriedades, que não foi alterado pelo processo de lixiviação, através da distribuição de frequência das propriedades mecânicas da matriz.

Figura 4 - Histograma dos Módulos de Elasticidade e Dureza

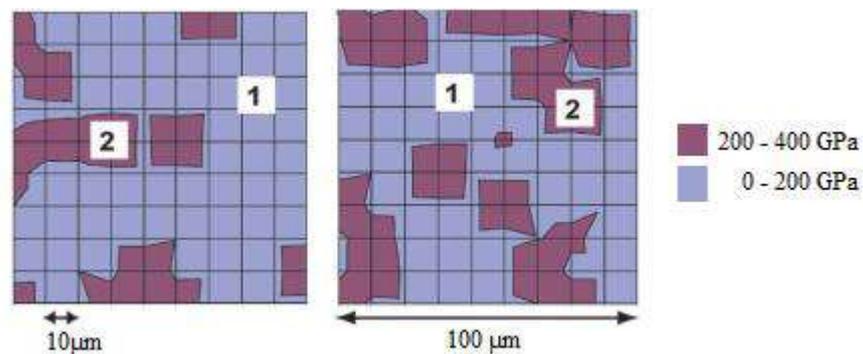




Fonte: Adaptado de Constantinides, Ulm e Van Vliet (2003, p. 194-195)

Os resultados encontrados por Constantinides *et al.* (2006) e Constantinides e Ulm (2007), através de testes de indentação em malha sobre um compósito de monoboreto de titânio-titânio (Ti-TiB) e de uma matriz cimentícia, respectivamente, mostram que o sistema de dados obtidos também podem ser transformados em uma distribuição contínua através de interpolações dos dados gerando um mapeamento das propriedades ao longo da região avaliada, como ilustrado pelas Figura 5 e Figura 6.

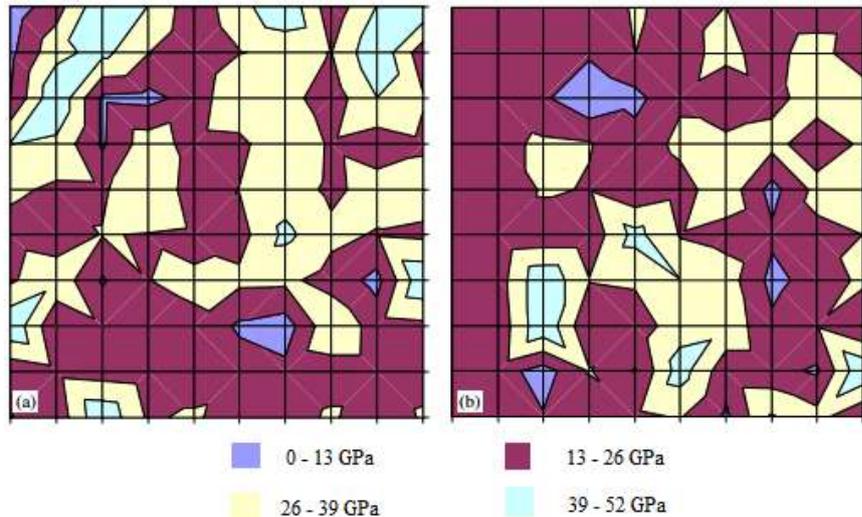
Figura 5 - Mapeamento mecânico dos resultados da indentação



Fonte: Adaptado de Constantinides et al. (2006, p. 198)

A análise de cada indentação fornece informações sobre as propriedades mecânicas em cada coordenada (x, y) da matriz definida, quanto menor for o espaçamento do “grid” maior a precisão encontrada pelas interpolações.

Figura 6 - Mapas mecânicos do módulo de indentação



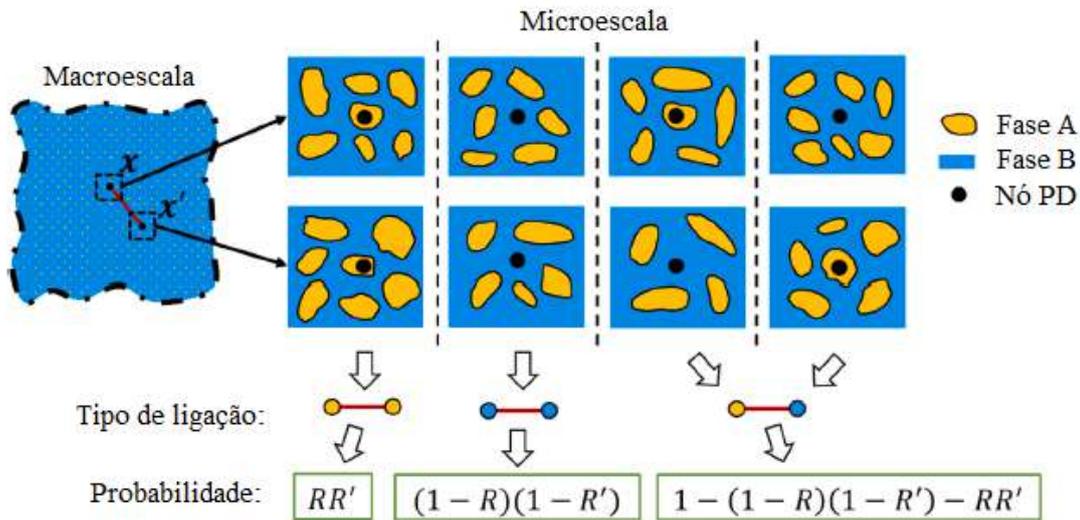
Fonte: Adaptado de Constantinides e Ulm (2007, p. 81)

2.2 Distribuição das propriedades

A definição da distribuição das propriedades heterogêneas e os modelos de caracterização do campo aleatório são abordados por diferentes autores, Rädels *et al.* (2017) estudaram a influência da distribuição probabilística das propriedades dos materiais no início da falha, utilizando um programa de peridinâmica de código aberto, o Peridigm, incorporando a aleatoriedade das propriedades durante a criação da malha de elementos finitos através da simulação numérica. Cabral *et al.* (2019) consideraram a natureza estocástica das propriedades mecânicas no modelo do material através da energia específica de fratura, considerando-a um campo aleatório por meio de uma distribuição de densidade de probabilidade Weibull.

Zhao *et al.* (2020) trabalharam com um modelo peridinâmico estocástico, utilizando algumas informações sobre a microestrutura do concreto, com o objetivo de destacar a importância de preservar informações acerca da heterogeneidade dos materiais. Para representar a heterogeneidade o modelo proposto considerou as propriedades de duas fases do concreto, fase A (agregados) e fase B (matriz) e três tipos de ligações, como representado na Figura 7.

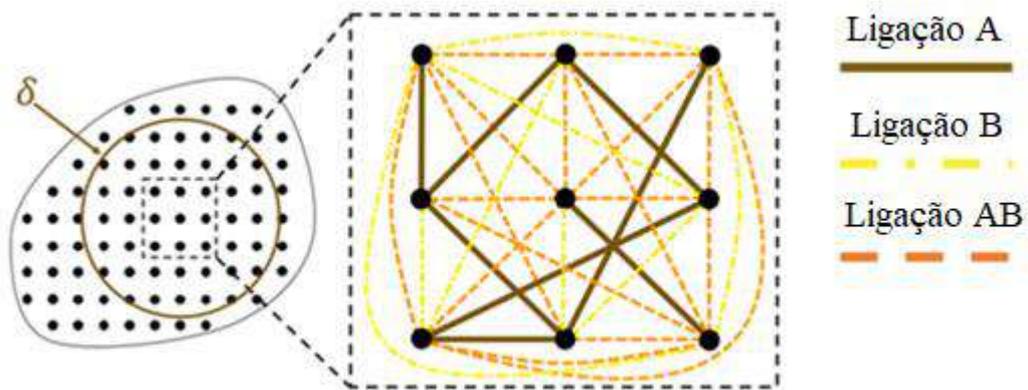
Figura 7 - Determinação das propriedades de uma ligação PD



Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2020, p. 6)

A probabilidade de ocorrência de cada fase do material é determinada de acordo com a fração de volume que constitui cada fase e as propriedades das ligações são calculadas com base na energia específica de fratura das fases em macroescala, obtidas experimentalmente. Para determinar as propriedades que cada nó da discretização, e posteriormente determinar as ligações, é utilizado um algoritmo que tem como entrada a informação sobre as frações dos volumes de cada fase e com isso as propriedades nos nós são geradas aleatoriamente, respeitando as frações de cada material. A Figura 8 mostra um exemplo de distribuição do tipo de ligação no modelo em torno de um nó específico, criando o campo aleatório das propriedades.

Figura 8 - Um exemplo de possível distribuição de propriedades de ligação em um nó no modelo



Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2020, p. 6)

No trabalho de Friedrich, Da Silva e Iturrioz (2019), o campo aleatório 3D é determinado por meio da distribuição de probabilidade Weibull da energia específica de fratura e do comprimento de correlação da propriedade, o que faz com que cada ligação PD se torne diferente. No artigo de Puglia *et al.* (2010) e Puglia *et al.* (2019) é detalhada a simulação do campo aleatório 3D no LDEM, considerando a tenacidade à fratura do material heterogêneo como o parâmetro que caracteriza a aleatoriedade do material, utilizando uma metodologia que descreve as propriedades independentemente da malha utilizada no modelo LDEM.

As análises realizadas por Puglia *et al.* (2019) mostraram que qualquer caracterização de campo aleatório realizada sem considerar o L_{cor} das propriedades, interferem significativamente nos padrões de fratura para os diferentes comprimentos de discretização das malhas adotadas. Entretanto, quando o L_{cor} do material é considerado, a diferença é mínima e apenas reflete a influência da densidade da malha escolhida, o que provavelmente diminui à medida que a densidade da malha aumenta.

2.2.1 Geoestatística

A estatística não espacial é aquela conhecida por considerar as variáveis estudadas como aleatórias e independentes entre si. No entanto, durante os estudos de concentrações de ouro em minério, Krige (1951) observou que a estatística não espacial não era suficiente para compreender o comportamento desse fenômeno e que para isso era preciso levar em consideração a distância entre as amostras analisadas.

A partir da necessidade levantada por Krige (1951), de considerar a localização espacial do material investigado, Matheron (1963) chegou as mesmas conclusões e com isso desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas, com o objetivo de enfatizar matematicamente o aspecto espacial dos dados levando em conta a localização, a continuidade e anisotropia no tratamento dos dados, onde a variável regionalizada é uma variável aleatória que assume um valor definido em cada ponto do espaço. Originando-se assim as primeiras formulações matemáticas da geoestatística, dentre elas a ferramenta principal da geoestatística, responsável por definir o grau de significância da continuidade/dependência espacial entre as amostras, o Semivariograma.

2.2.2 Semivariograma

Segundo Vieira *et al.* (1983) existem várias funções matemáticas que podem estimar o grau de dependência espacial entre observações vizinhas, como a autocorrelação e autocovariância. Entretanto quando as amostras se encontram distribuídas em duas dimensões e a interpolação de valores é um aspecto importante para o estudo, a técnica mais indicada é o Semivariograma.

O Semivariograma é a ferramenta que representa graficamente a dependência espacial de duas amostras separadas no espaço por uma distância h . O gráfico do Semivariograma, ilustrado na Figura 9, é construído através dos valores de semivariância ($\gamma(h)$) no eixo vertical versus a distância h correspondente, no eixo horizontal (CLARK, 1979). Matematicamente o semivariograma, ou semivariograma experimental, é definido por autores como Vieira *et al.* (1983), Isaak e Srivastava (1989), entre outros, de acordo com a Equação (3):

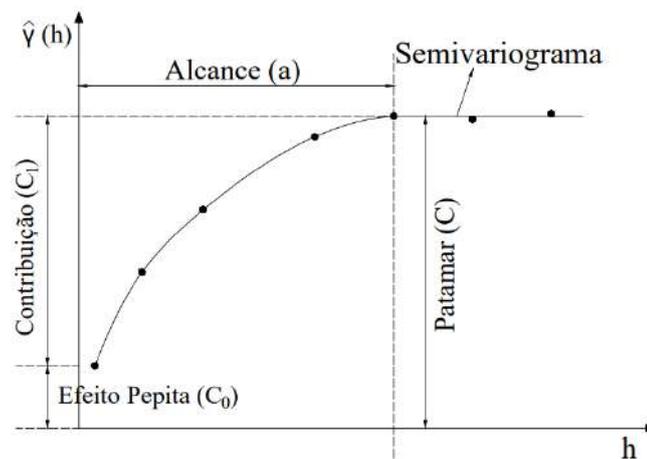
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Onde:

- N é o número de pares de observações, $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, separados pelo vetor distância h ;
- $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são as observações.

Através da Equação (3), percebe-se que se espera que quanto menor a distância h , maior será a relação entre as amostras.

Figura 9 - Modelo de semivariograma



Fonte: Adaptado de Teixeira e Scalon (2013, p. 251)

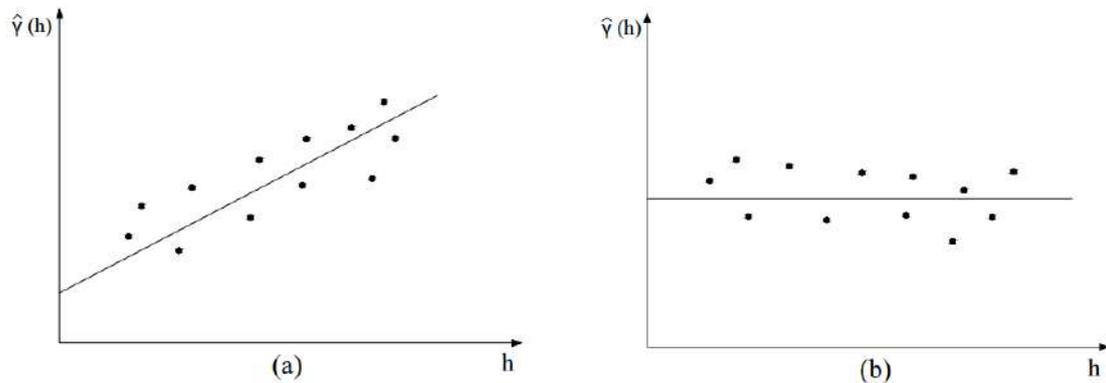
- Alcance (a): valor referente a distância das amostras que apresentam valores correlacionados espacialmente;
- Patamar (C): valor da semivariância, relativo ao alcance encontrado para o conjunto de observações;
- Efeito Pepita (C_0): representa o valor de semivariância quando $h = 0$, ou seja, quando o valor de h é menor que a menor distância adotada entre as amostras observadas;
- Contribuição (C_i): corresponde a diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C_0).

O Semivariograma construído a partir dos dados coletados experimentalmente é conhecido como semivariograma experimental, além deste existem outros dois: o semivariograma verdadeiro, que descreve o exato comportamento do fenômeno estudado e portanto não é conhecido, e o semivariograma teórico que trata-se do semivariograma experimental ajustado a modelos teóricos, de forma a garantir a representação mais próxima possível da tendência apresentada pelas semivariâncias calculadas no semivariograma experimental (WOJCIECHOWSK *et al.*, 2009). O ajuste pelo semivariograma teórico é necessário porque permite realizar a interpolação dos dados por krigagem.

2.2.2.1 Ajuste do Semivariograma Teórico

Os modelos teóricos de semivariogramas para o ajuste do semivariograma experimental podem ser divididos em dois grupos principais, sendo eles os modelos com patamar e os sem patamar (ISAAK; SRIVASTAVA, 1989). Os casos de semivariogramas sem patamares ocorrem em duas possíveis situações: existe uma dispersão infinita dos dados, como ilustrado na Figura 10- (a), ou quando não foi identificado nenhum tipo de dependência espacial entre os pontos observados, conhecidos como efeito pepita puro, ilustrado na Figura 10- (b) (CLARK, 1979).

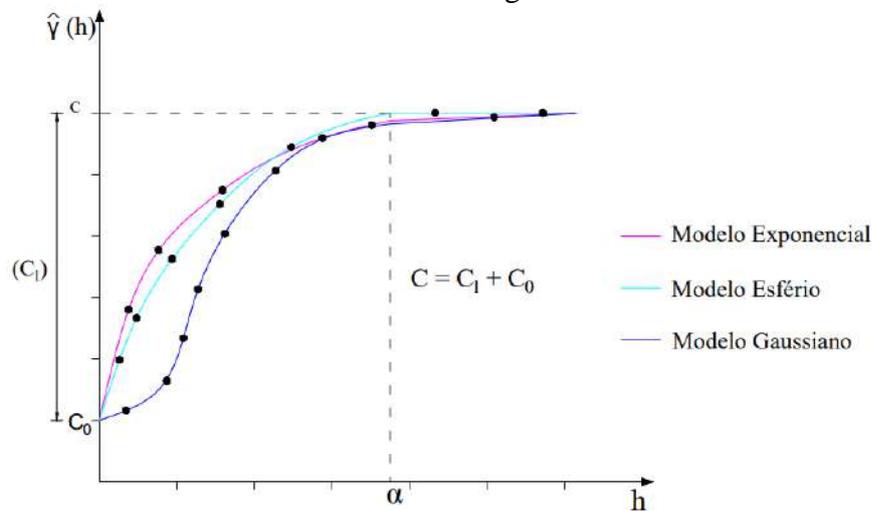
Figura 10 - Modelos sem patamar (a) Semivariograma sem patamar; (b) Semivariograma com efeito pepita puro



Fonte: Adaptado de Teixeira (2013, p. 34)

Dentre os modelos teóricos do grupo com patamar, os mais conhecidos são os modelos teórico esférico, exponencial e o gaussiano. Na Figura 11 é possível visualizar graficamente o comportamento de cada um deles.

Figura 11 - Modelos teóricos básicos de semivariogramas



Fonte: Adaptado de Camargo (1997, p. 19)

- Modelo Esférico: Também conhecido como modelo de Matheron, é o modelo com maior utilização entre os demais. Esse modelo é descrito matematicamente pela Equação (4), graficamente ele inicia em C_0 até o patamar C .

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & |h| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right] = C_0 + C_1 [Sph(|h|)], & < |h| \leq a \\ C_0 + C_1, & |h| > a \end{cases} \quad (4)$$

- Modelo Exponencial: é representado matematicamente pela Equação (5). Graficamente esse modelo atinge o patamar apenas assintoticamente.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & |h| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) \right] = C_0 + C_1 [Exp(|h|)], & |h| \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

- Modelo Gaussiano: é expresso matematicamente pela Equação (6). Assim como no modelo exponencial, atinge o patamar assintoticamente, no entanto a curva assume uma forma parabólica.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & |h| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{|h|^2}{a}\right) \right] = C_0 + C_1 [Gau(|h|)], & |h| \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

3 METODOLOGIA

Este tópico é dedicado a apresentação da caracterização dos materiais, assim como as respectivas normas utilizadas e a descrição dos procedimentos necessários na produção dos corpos de prova de concreto desenvolvidos com agregado graúdo do tipo Brita 1 (dimensão máxima característica de 19 mm). Os sistemas empregados na execução dos ensaios mecânicos, destrutivos e não destrutivos do programa experimental também são descritos nesse capítulo, assim como, uma breve explicação de como o processamento dos dados obtidos nos ensaios experimentais é realizado.

Para avaliar a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo na distribuição espacial das propriedades do concreto, foram desenvolvidos anteriormente como uma parte desta pesquisa, corpos de prova de concreto com mesmo traço e geometria, diferindo apenas na dimensão máxima característica do agregado graúdo, assim, além de placas de concreto produzidas com Brita 1, placas de concreto C50 foram produzidas com Brita 0 (dimensão máxima característica de 12,5 mm) e Brita 2 (dimensão máxima característica de 25 mm). A produção e o programa experimental das amostras com Brita 0 e Brita 2, bem como os resultados experimentais encontrados para essas amostras, foram publicados anteriormente como parte do trabalho de conclusão de curso de Azzolin (2019), onde a autora avaliou a determinação da resistência à compressão através do ensaio de esclerometria e analisou previamente a variação dos resultados com relação a dimensão máxima característica dos agregados graúdos utilizados. Neste trabalho, os dados coletados por Azzolin (2019) serão avaliados sob o ponto de vista da distribuição espacial.

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento da pesquisa moldaram-se corpos de prova de concreto, com resistência característica a compressão (f_c) de 50 MPa (C50). Os materiais, assim como o traço utilizado na dosagem do concreto, são listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Consumo do material

Materiais	Cimento (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Brita (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)	a/c	Teor de Argamassa (%)	Aditivo (%)
Consumo	445,59	753,49	1028,87	196,06	0,44	53,82	0,24

Fonte: Elaboração própria

A seguir é possível conferir as informações referentes a caracterização dos materiais utilizados na produção do concreto C50.

3.1.1 Aglomerante

O cimento definido foi o CP IV-ARI da marca Votoran, adquirido no comércio local de Alegrete. A massa específica do material foi determinada através da NBR 16605 (ABNT, 2017), possuindo um valor de 2,98 g/cm³.

3.1.2 Agregados

Como agregado graúdo foi utilizado a brita 01 (Figura 12- (b)), com formato de grãos predominantemente cúbicos, e como agregado miúdo utilizou-se a areia média (Figura 12- (a)). Ambos foram adquiridos juntamente com a empresa Pedra Rosada, localizada em Alegrete.

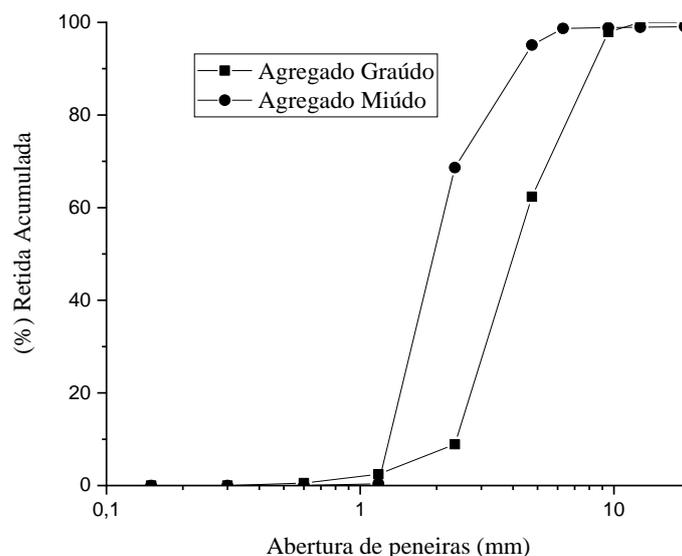
Figura 12 - Agregados utilizados (a) brita 01; (b) areia média



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 13 encontra-se a curva granulométrica dos agregados, determinada conforme recomenda a NBR NM 248 (ABNT, 2003). As propriedades de massa específica, massa específica aparente e a absorção de água do agregado graúdo foram determinadas de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009), enquanto a massa específica unitária pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). Os valores correspondentes são detalhados na Tabela 2.

Figura 13 - Curva granulométrica dos agregados



Fonte: Elaboração própria

Tabela 2 - Características específicas do agregado graúdo

Massa específica agregado seco (g/cm^3)	2,88
Massa específica saturada superfície seca (g/cm^3)	2,79
Massa específica aparente (g/cm^3)	2,71
Absorção de água (%)	1,94
Dimensão máxima característica (mm)	12,70
Módulo de finura (%)	5,60

Fonte: Elaboração própria.

Para o agregado miúdo, a massa específica e massa específica aparente foram estabelecidas conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009), enquanto a massa específica unitária seguiu a NBR NM 45 (ABNT, 2006). Os resultados são listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Características Específicas do agregado miúdo

Massa específica (g/cm^3)	2,63
Massa Específica Aparente Agregado Seco	2,58
Massa Específica Saturada Superfície Seca	2,60
Dimensão máxima característica (mm)	0,6
Módulo de finura (%)	1,72

Fonte: Elaboração própria

3.1.4 Aditivo

Para fins de trabalhabilidade foi utilizado na mistura o superplastificante MC - PowerFlow da empresa MC – Bauchemic Brasil Indústria e Comércio Ltda. O aditivo possui densidade de $1,05 \text{ g/m}^3$, conforme fornecido pelo fabricante.

3.2 Produção das Amostras

Após a caracterização dos materiais, eles foram separados e pesados conforme as proporções estabelecidas na Tabela 1. Para a preparação da mistura foi utilizada a betoneira, com uma capacidade de até 400 litros, disponível no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete.

A trabalhabilidade da mistura foi verificada através do ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), conforme estabelecido na NBR NM 67 (ABNT, 1998), apresentando um abatimento de 90 mm, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Ensaio de abatimento de tronco de cone



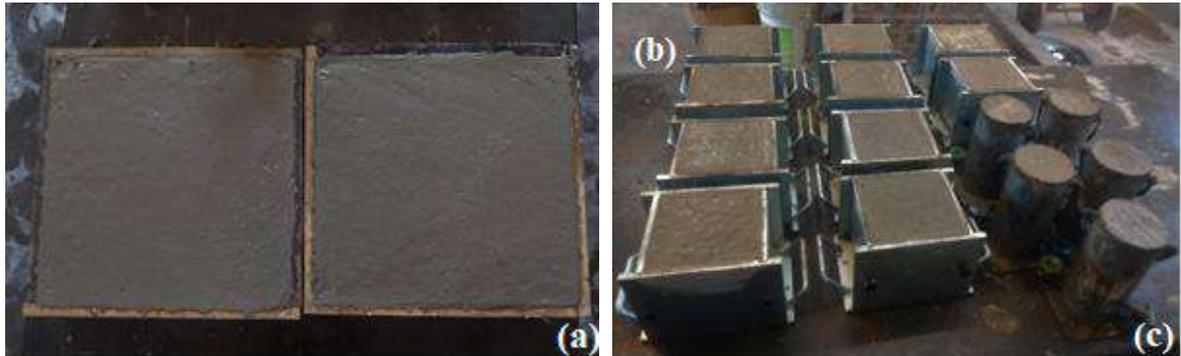
Fonte: Acervo da autora

Com o concreto no estado fresco, foram moldados os corpos de prova cilíndricos (20 cm de altura e 10 cm de diâmetro), placas (40 cm largura, 40 cm de comprimento e 10 cm de altura) e cúbicos (15 cm de lado). Após o preenchimento das formas, o concreto foi compactado através do uso da mesa vibratória, onde as formas foram dispostas sobre ela e vibradas por

alguns segundos, até que o concreto preenchesse todos os espaços das fôrmas e apresentando uma superfície regularizada.

Após a desforma das amostras, elas permaneceram em cura úmida durante 28 dias após a concretagem. Algumas das amostras podem ser visualizadas na Figura 15.

Figura 15 - Modelos de amostras moldadas; (a) placas; (b) cúbicos e (c) cilíndricos



Fonte: Acervo da autora

3.3 Ensaios Mecânicos

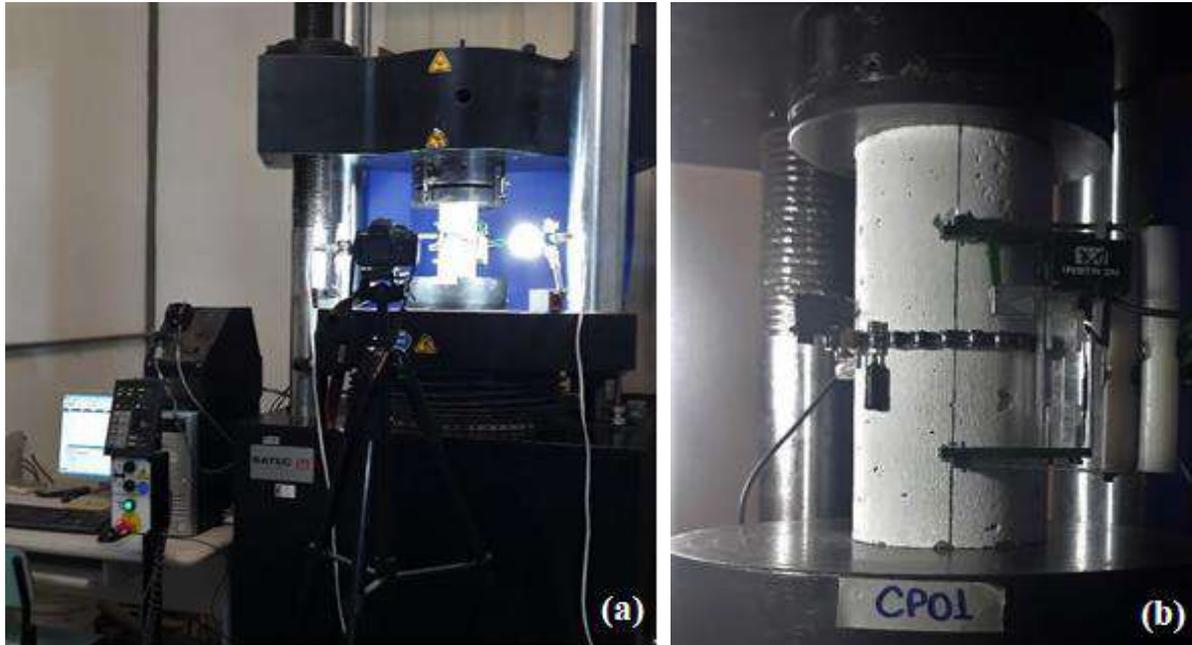
Após a cura, as amostras foram submetidas a ensaios mecânicos, dentre eles o ensaio de compressão axial, ensaio de esclerometria e ensaio de esclerometria sob tensão de compressão axial. Os tópicos a seguir descrevem de forma detalhada cada procedimento realizado.

3.3.1 Ensaio de Compressão Axial

Para a verificação da resistência característica atingida pelo concreto C50, 3 amostras cilíndricas foram separadas após o fim da concretagem de cada mistura e destinadas para o ensaio de compressão axial.

A execução do ensaio seguiu as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), sendo realizado na máquina de ensaios mecânicos INSTRON, SATEC séries, modelo 5590-HVL, ilustrada na Figura 16- (a), que tem capacidade de carga de até 1500 kN. Durante o ensaio a taxa de carregamento utilizada foi de 0,05 mm/min e para obter o comportamento *tensão x deformação* do material as amostras foram instrumentadas com aparelhos extensômetros fixados aos corpos de prova, como mostra a Figura 16- (b).

Figura 16 - Ensaio de compressão axial nas amostras cilíndricas; (a) Máquina de ensaios mecânicos e aquisição de dados; (b) Instrumentação da amostra



Fonte: Acervo da autora

3.3.2 Ensaio de Esclerometria

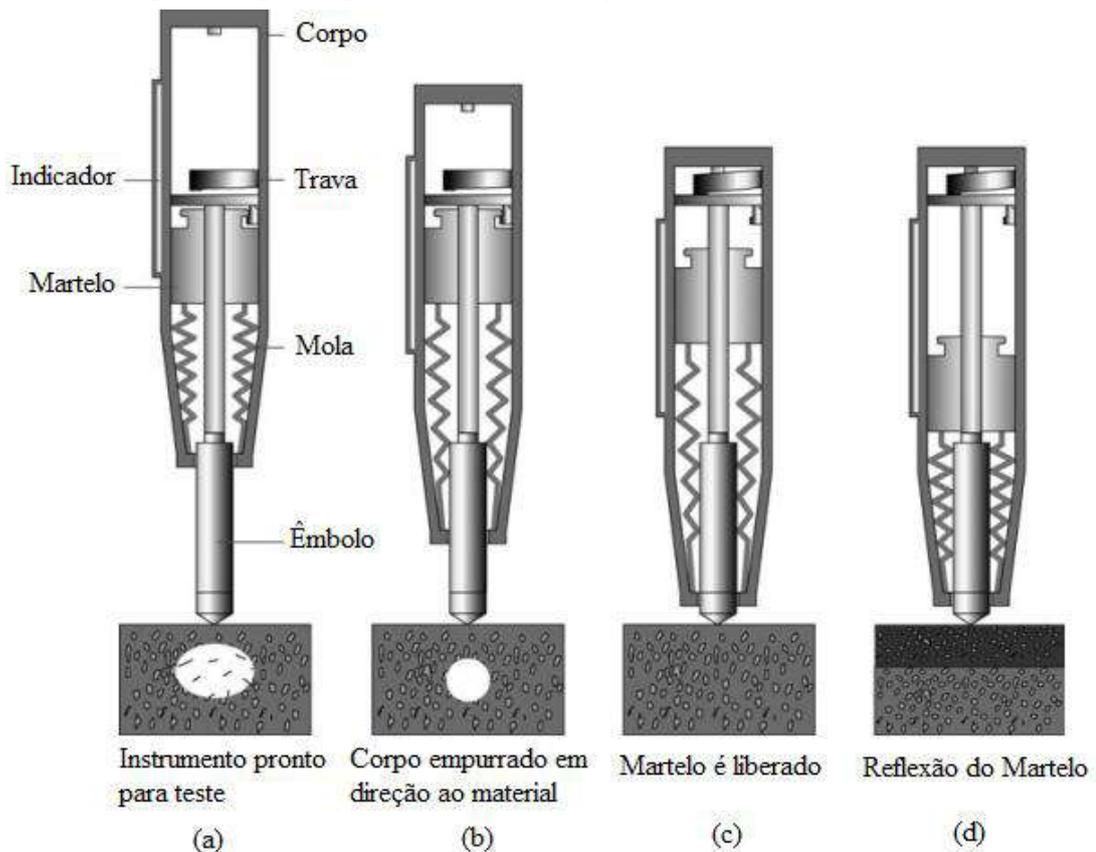
O ensaio de esclerometria de reflexão é o método utilizado para avaliar a propriedade de dureza superficial do concreto em seu estado endurecido, conforme estabelecido pela NBR 7584 (ABNT, 2012). O ensaio tem como objetivo medir o índice de dureza superficial através do impacto do esclerômetro de reflexão (ou martelo de reflexão) em determinados pontos da superfície do material, fornecendo informações acerca da qualidade e possibilitando estabelecer relação com a resistência do concreto (SAMPAIO, 2010).

Entre as vantagens apresentadas pelo método, está o fato dele ser um ensaio mecânico não destrutivo (END), em que os impactos aplicados na superfície deixam pouco ou nenhum dano no local nem causam problemas futuros no desempenho do componente estrutural, além disso o equipamento é leve, barato e simples de operar. Não necessitando de fonte de energia, o aparelho permite rapidez e facilidade na aquisição de dados e ainda viabiliza realização dos ensaios in situ (EVANGELISTA, 2002; PALÁCIOS, 2012; SAMPAIO, 2010).

O ensaio consiste em posicionar o equipamento perpendicularmente à superfície analisada, impulsionando então o corpo do esclerômetro firmemente sobre ela, liberando assim a mola que ativa o sistema massa-martelo, fazendo com que a ponta do pistão imprima golpes com uma certa energia, que é transmitida ao concreto, causando assim uma deformação elastoplástica naquela região. Conforme a NBR 7584 (ABNT, 2012), o concreto ao se recuperar

da deformação elástica rebate o sistema massa-martelo, essa ação provocada o movimento do cursor sobre a escala graduada, onde o valor de reflexão é mantido fixo, via dispositivo de travamento, até que ele tenha sido anotado. Na Figura 17 é possível visualizar uma representação simples da realização do ensaio.

Figura 17 - Representação esquemática da realização do ensaio de esclerometria



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2006, p. 389)

3.3.2.1 Correlação com a resistência à compressão

Conforme a NBR 7584 (ABNT, 2012) ressalta, o aparelho fornece junto ao seu corpo um gráfico para correlacionar a resistência à compressão com os valores do IE medidos no ensaio. No entanto, o ábaco fornecido apresenta valores correspondentes a concretos preparados em outros países, com materiais e condições diferentes das brasileiras.

Devido a isso, diversos pesquisadores brasileiros passaram a desenvolver em seus estudos experimentais curvas de ajuste que representassem corretamente a correlação entre o índice esclerométrico (IE) e a resistência à compressão (f_c) (SAMANIEGO, 2014). Algumas das equações desenvolvidas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Equações para correlação da dureza com a resistência à compressão

Autor	Equação	Agregado graúdo	Fck (MPa)
Evangelista (2002)	(1) $f_c = 0,033IE^{2,02}$	Gnaise: 19 mm	11 - 53
	(2) $f_c = 0,007IE^{2,477}$	Gnaise: 9,5 mm	10 - 46
	(3) $f_c = 0,0252IE^{2,128}$	Traquito: 19 mm	8 - 49
Machado (2005)	(4) $f_c = 0,026IE^{2,044}$	Gnaise, Sienito: 19 mm	15 - 50
Câmara (2006)	(5) $f_c = 1,588IE - 17,423$	Granítica	20 - 50
Aydin e Saribiyik (2010)	(6) $f_c = 11,612IE - 52,03$	Calcário britado	15 - 50
Qasrawi (2010)	(7) $f_c = 1,353IE - 17,393$	-	10 - 40
Joffily (2010)	(8) $f_c = 2,4IE - 39,4$	-	25 - 45

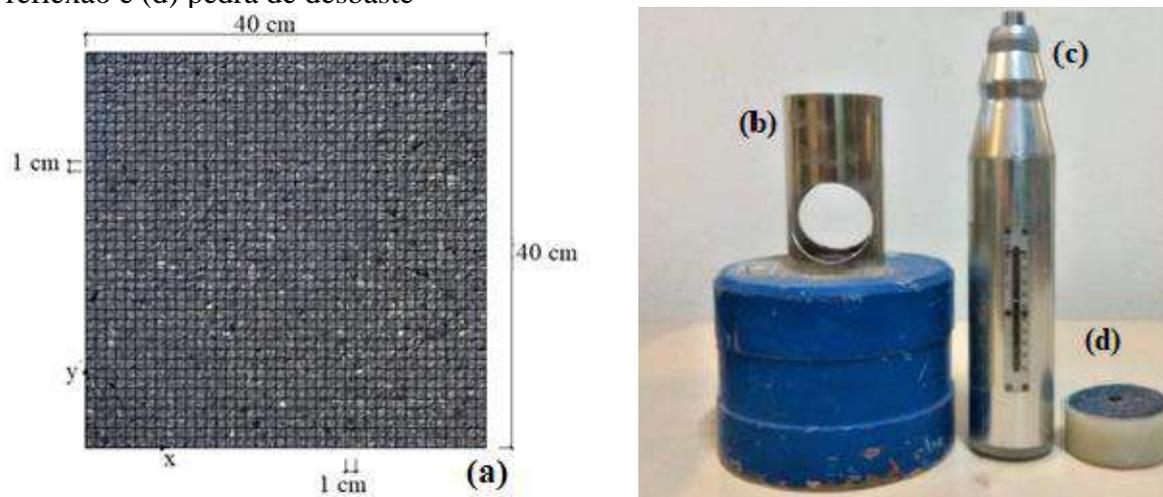
Fonte: Adaptado por Alves (2017) com base em Palácios (2012)

Devido à classe do concreto aqui desenvolvido e ao agregado graúdo utilizado, a equação adotada para a correlação com a resistência à compressão foi a determinada por Machado (2005).

3.3.2.1 Ensaio de Esclerometria nos Placas de Concreto

Nas superfícies das amostras foram definidas malhas regulares, com espaçamentos horizontais e verticais fixados em 10 mm de distância, conforme ilustrado na Figura 18- a.

Figura 18 - Ensaio de esclerometria; (a) malha regular; (b) bigorna; (c) esclerômetro de reflexão e (d) pedra de desbaste



Fonte: Elaboração própria

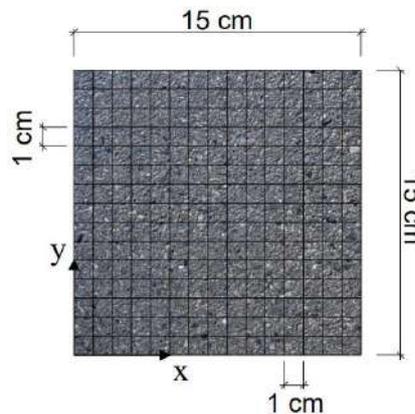
Em cada ponto da malha foi medido o índice esclerométrico da superfície do concreto através do esclerômetro de reflexão (Figura 18- c). Antes de começar o ensaio o esclerômetro foi calibrado na bigorna (Figura 18- b) como recomendado pela NBR 7584 (ABNT, 2012). No caso das superfícies que apresentaram alguma irregularidade, a pedra de desbaste (Figura 18- d), foi utilizada como mecanismo de correção.

3.3.2.2 Ensaio de Esclerometria sob Tensão de Compressão

As amostras cúbicas foram utilizadas na análise da interferência do carregamento (estado de tensões) sobre a distribuição espacial da dureza, bem como sobre o comprimento de correlação do material.

Assim como para os primas de concreto, uma malha regular foi definida em todas as faces dos cubos, como na Figura 19. O índice esclerométrico foi medido em cada ponto da malha, seguindo os mesmos procedimentos descritos para o ensaio realizado nos primas.

Figura 19 - Malha regular para o ensaio de esclerometria sob tensão de compressão



Fonte: Elaboração própria

Primeiramente as medidas de índice esclerométrico foram realizadas nas faces paralelas ao lançamento do concreto, denominadas aqui como face inferior (face em contato com o fundo da forma) e face superior. O ensaio para essas faces ocorreu sem a influência de carregamento, apenas com o intuito de avaliar se existe diferença com relação a direção do lançamento e posições das medições.

Para realização dos ensaios sob tensão nas 4 faces restantes, os cubos foram posicionados na máquina de ensaios mecânicos INSTRON como mostra a Figura 20, com as duas faces já analisadas sendo comprimidas.

Figura 20 - Posicionamento das amostras cúbicas na máquina de ensaio



Fonte: Acervo da autora

Na avaliação dos índices sob tensão, foram definidos 4 patamares de carregamento para o teste, utilizando uma face para cada patamar. Os patamares definidos foram 0% (referência), 50%, 60% e 75% da tensão média de ruptura, obtida previamente através do ensaio de compressão das amostras cilíndricas.

3.4 Processamento dos Dados

Para avaliar os dados encontrados experimentalmente será utilizado a Linguagem de programação R. O software possui pacotes como o “*geoR*” e “*gstat*” que permitem a realização de análises geoestatísticas, como a construção do semivariograma experimental e teórico, permitindo assim definir os comprimentos de correlação das propriedades estudadas.

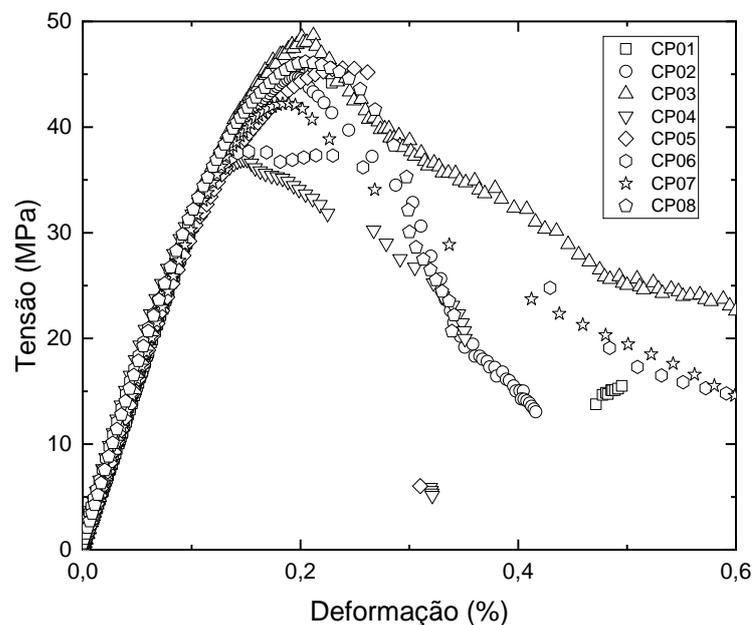
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo 4 são apresentados os resultados encontrados através do programa experimental, definido no item 3 e a análise dos dados. É realizada a investigação acerca da interferência da dimensão máxima característica do agregado graúdo na resistência do concreto bem como na distribuição espacial da dureza. Além disso, será estudada a influência da tensão atuante nos valores de índices esclerométricos medidos nas faces das amostras cúbicas, bem como na resistência a compressão determinada através da correlação dos dados de dureza. Para ambas as amostras, placas e cubos de concreto, o efeito do confinamento criado pela interface do concreto com a forma, também foi avaliado.

4.1 Resistência à compressão

Na Figura 21 é possível visualizar as curvas de “*tensão x deformação*” apresentadas pelos corpos de prova cilíndricos ensaiados à compressão axial. Cabe salientar aqui que são apresentados oito resultados, três deles correspondentes a data quando foram concretadas as placas e mais cinco correspondentes à concretagem das amostras cúbicas. Não há diferença entre os resultados das duas concretagens, por este motivo os resultados são apresentados juntos. Assim, para o traço de concreto com Brita 1, a resistência média à compressão obtida no ensaio de compressão axial foi de 43,638 MPa, com coeficiente de variação de 9,87 %.

Figura 21- Gráfico Tensão x Deformação das Placas de Concreto



Fonte: Elaboração própria

Afim de avaliar a influência do agregado graúdo na resistência à compressão axial do concreto, comparou-se os resultados encontrados no trabalho realizado por Azzolin (2019), que utilizou o mesmo traço de dosagem, diferindo apenas na definição do agregado graúdo. Assim, no lugar de brita 1 utilizou-se brita 0 e brita 2. As resistências a compressão axial destes concretos são exibidas na Tabela 5.

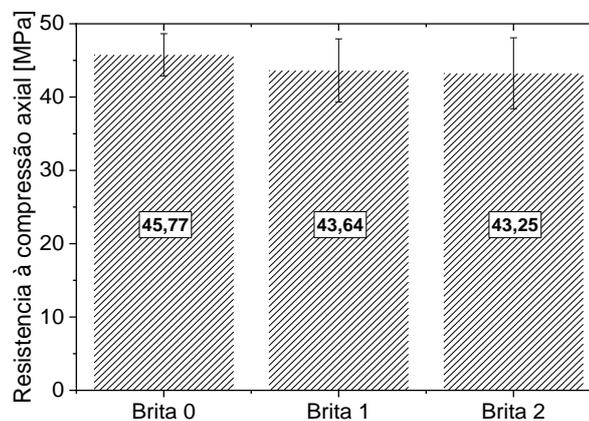
Tabela 5 – Resistência a compressão axial dos concretos com Brita 0 e brita 2 (Azzolin, 2019)

	Resistência à Compressão (MPa)	
	Brita 0	Brita 2
CP01	48,29	38,78
CP02	42,63	48,39
CP03	46,39	42,57
Média (MPa)	45,77	43,25
CV (%)	6,29	11,19

Fonte: Elaboração própria

Por mais que aparentemente haja uma diminuição da resistência com a dimensão máxima característica da brita, como se pode ver na resistência média, indicada na Figura 22, através da análise estatística realizada para as resistências à compressão axial dos concretos produzidos com os 3 diferentes tipos de britas, encontrou-se que não há diferença significativa na resistência do material com a mudança da dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado. Devido à grande variabilidade dos dados, constata-se a necessidade de realizar a avaliação para um número maior de amostras, com objetivo de diminuir o erro dos dados.

Figura 22 – Resistência média à compressão para os diferentes agregados graúdos



Fonte: Elaboração própria

4.2 Placas de concreto

Além de avaliar a influência na resistência à compressão axial de diferentes tipos de agregados graúdos para o mesmo traço de concreto, o estudo também buscou analisar como os 3 tipos de agregados graúdo podem interferir na distribuição espacial das propriedades do material. Para melhor compreensão dos resultados, a nomenclatura adotada para as placas foi dividida conforme o agregado utilizado e segundo a face na qual os índices esclerométricos foram medidos, sendo denominada como face inferior àquela em confinamento com o fundo das forma e superior a face livre das amostras. As nomenclaturas podem ser verificadas de forma detalhada na Tabela 6, abaixo.

Tabela 6 - Nomenclatura das amostras

Brita	Placa	Face	Nomenclatura
0	1	Superior	B0FS ¹
		Inferior	B0FI ¹
	2	Superior	B0FS ²
		Inferior	B0FI ²
1	1	Superior	B1FS ¹
		Inferior	B1FI ¹
	2	Superior	B1FS ²
		Inferior	B1FI ²
2	1	Superior	B2FS ¹
		Inferior	B2FI ¹
	2	Superior	B2FS ²
		Inferior	B2FI ²

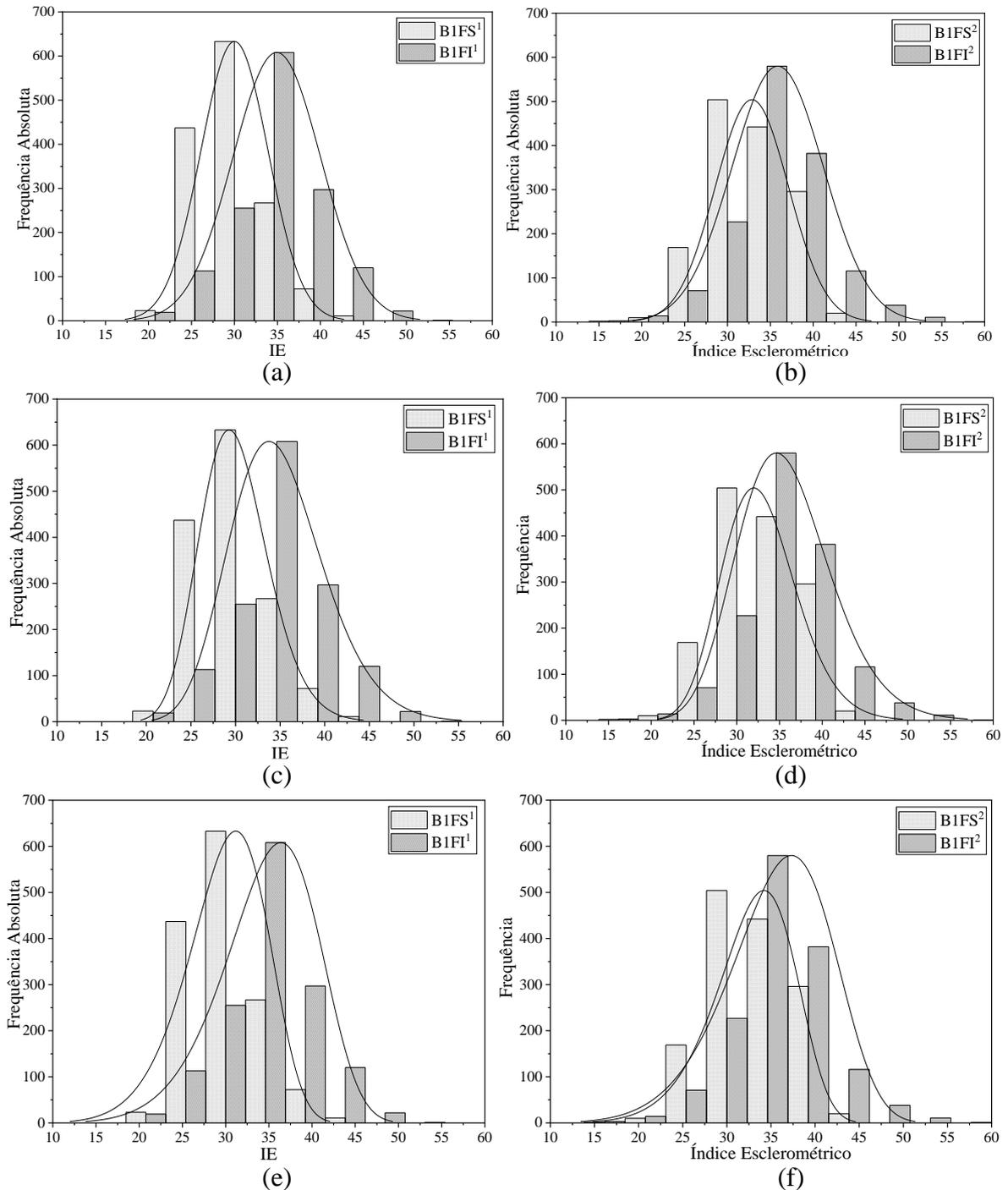
Fonte: Elaboração própria

4.2.1 Brita 1

Em relação ao comportamento espacial dos dados, primeiramente foram gerados gráficos de histogramas a partir dos valores de IEs, afim de conhecer a distribuição de frequência dos dados de cada uma das faces analisadas, e podem ser visualizados na Figura 23.

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros estimados para as três distribuições representadas na Figura 23, assim como os valores médios dos IEs correspondentes a cada superfície e o coeficiente de variação dos dados. Salienta-se que nesta análise foram eliminados os outliers por meio de um teste de normalidade.

Figura 23- Histogramas com ajuste normal (a) placa 01 e (b) placa 02; lognormal (c) placa 01 e (d) placa 02 e Weibull (e) placa 01 e (f) placa 02



Fonte: Elaboração própria

Segundo as informações fornecidas pelos histogramas da Figura 23, nota-se que para ambas as placas a distribuição de frequência de IEs nas faces superiores tem sua concentração maior em torno de 30, enquanto para as faces inferiores a maior concentração de dados localiza-

se em torno de 35. Além disso, é possível identificar através da largura dos histogramas, que a placa dois, possui uma maior dispersão de dados.

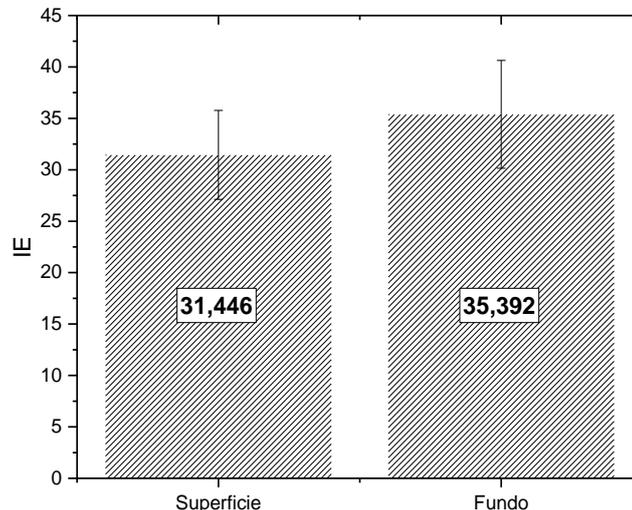
Tabela 7 - Dados estatísticos dos IEs para Brita 01

Placa de Concreto	Média	CV	Normal		Lognormal		Weibull	
			Location mu	Scale sigma	Location mu	Scale sigma	Scale alpha	Shape beta
B1FS ¹	31.446	13.76%	30.004	3.920	3.393	0.128	31.779	7.441
B1FS ²			32.848	4.286	3.483	0.134	34.726	8.368
B1FI ¹	35.392	14.83%	34.920	5.124	3.542	0.152	37.117	7.332
B1FI ²			35.858	5.327	3.568	0.153	38.141	7.020

Fonte: Elaboração própria

Fazendo uma anova entre a superfície superior e inferior, considerando todos os valores medidos na face inferior e superior juntos, encontra-se uma diferença significativa (95% de nível de confiança) entre a resistência na superfície superior e inferior. Assim, a superfície superior tem um IE médio de 31,446 e o inferior 35,392, como indicado na Figura 24.

Figura 24 – Média geral dos IEs para as superfícies superiores e inferiores



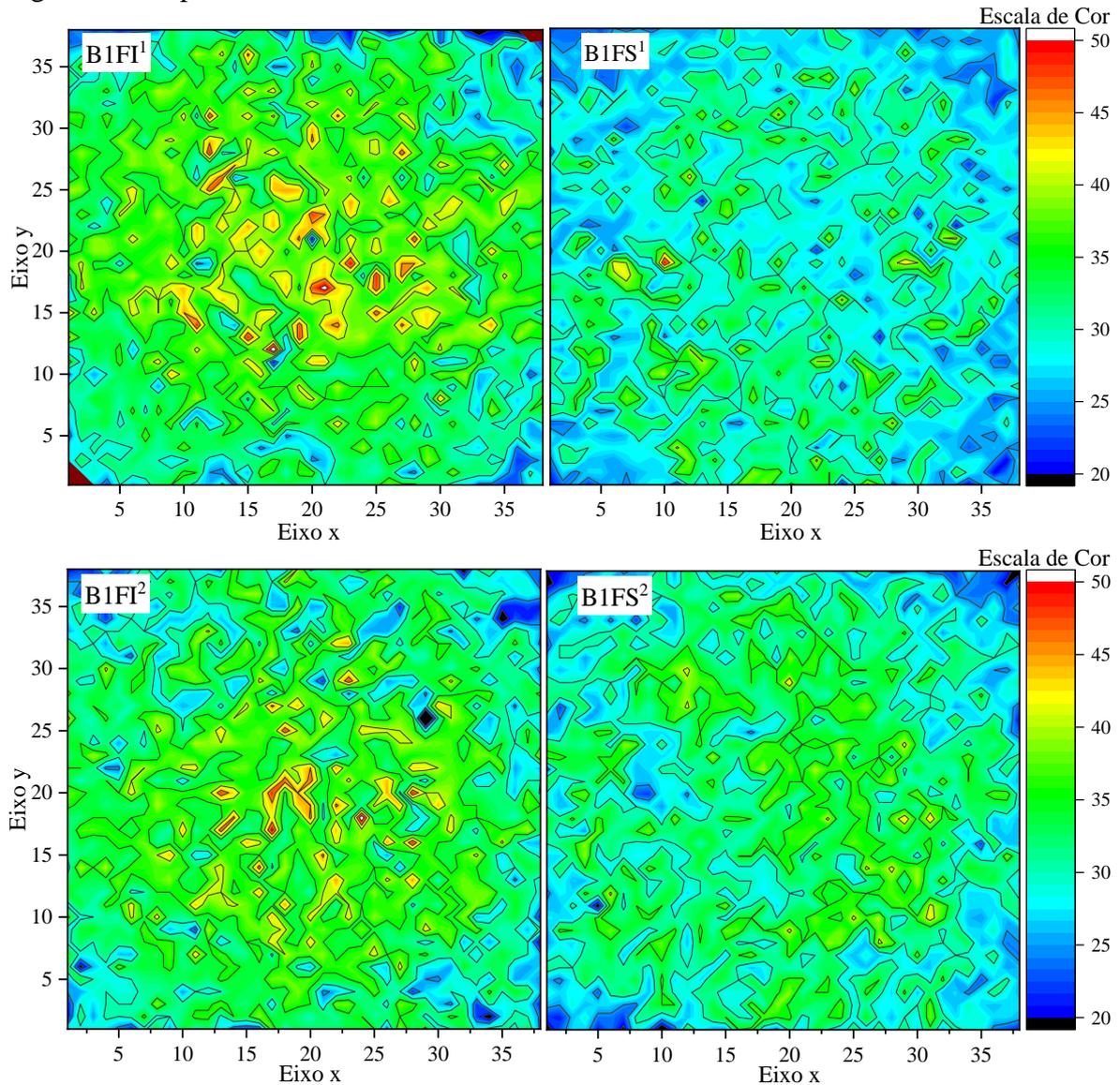
Fonte: Elaboração própria

Os parâmetros de localização (μ e α) das curvas de distribuição normal, lognormal e Weibull também mudam significativamente da superfície superior para a inferior (pois estão relacionados ao valor médio). Já os parâmetros de escala (σ) das distribuições normal e lognormal são significativamente diferentes entre a superfície superior e inferior, porém o

parâmetro de forma (beta) da distribuição de Weibull não varia significativamente. Como tem-se somente 2 amostras para cada caso, a variação deve ser muito evidente para que ela seja significativa.

Os mapas de contorno das superfícies, exibidos na Figura 25, permitem visualizar o comportamento dos dados ao longo das superfícies das placas de concreto, de acordo com a distribuição de frequência apresentada pelos histogramas da Figura 23.

Figura 25- Mapa de contorno Brita 01



Fonte: Elaboração própria

Por meio da análise dos mapas de contorno é possível perceber que as regiões das extremidades, que ficam em contato com as laterais das formas, apresentam os valores de IEs menores, em relação as demais regiões da face de concreto, esse fenômeno pode ser explicado

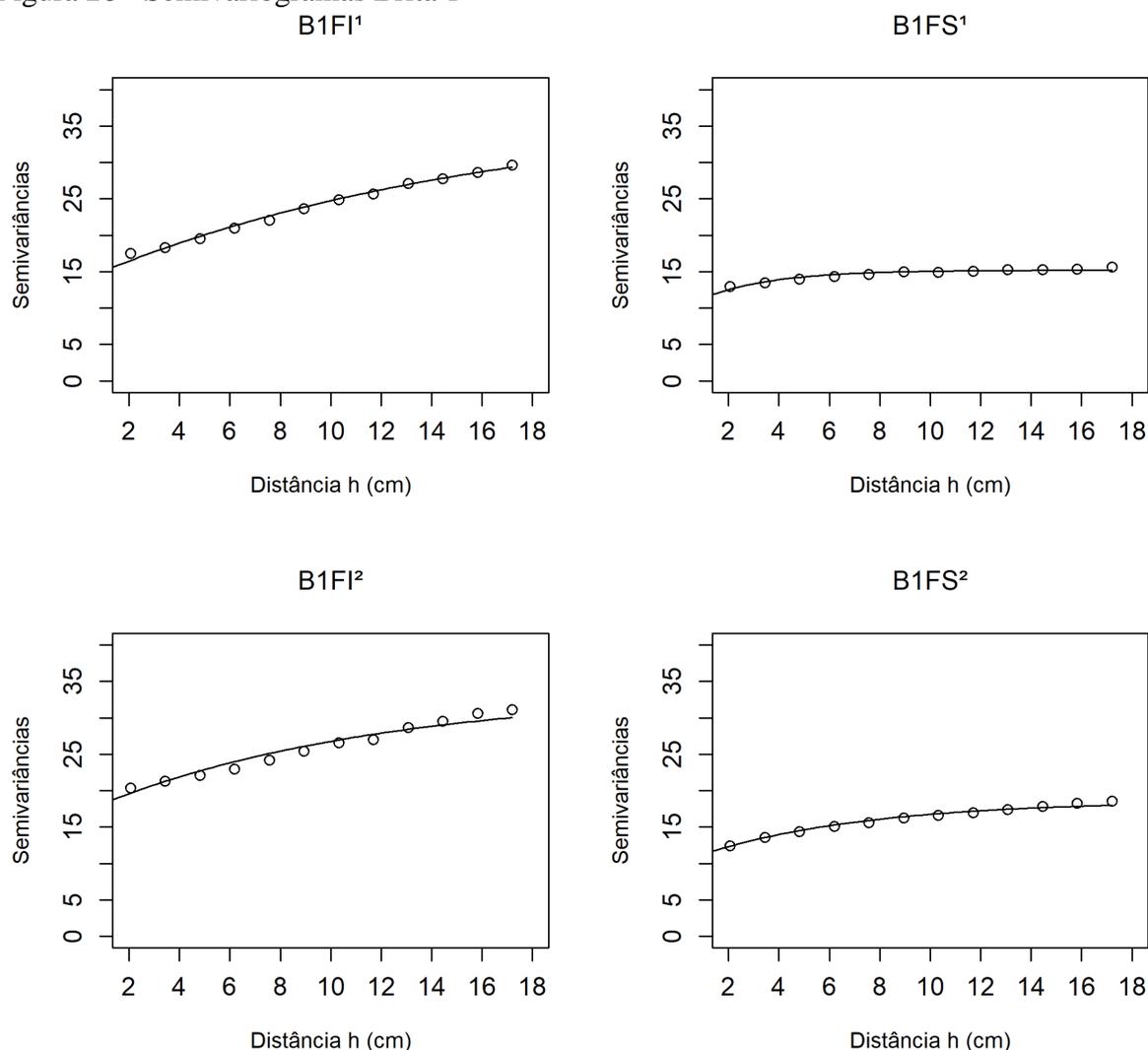
pela situação de contorno que as bordas apresentam, devido ao efeito de confinamento causado pelo contato com as formas.

A própria norma do ensaio de índice esclerométrico, NBR 7584 (ABNT, 2012), recomenda que as leituras sejam afastadas convenientemente de regiões como juntas de concretagem, cantos ou arestas, por exemplo, regiões essas que comumente apresentam comportamento frágil. As leituras de IEs foram realizadas a 10 mm da borda das placas, no entanto não impediu que as bordas da placa 1 face inferior fossem afetadas pelo impacto do esclerômetro, realizado durante o ensaio de reflexão, como pode ser observado na imagem. Além disso, à medida que as leituras se aproximam do centro da amostra de concreto, as medidas de IEs vão alcançando valores mais altos. A distribuição dos IEs pode ser dividida basicamente em 3 regiões de cores: azul, verde e amarelo, sendo as regiões em tom de azul as regiões que possuem os menores valores de dureza, girando em torno de 20 a 30. As regiões de tonalidade verde, muito presente nas faces inferiores de ambas as placas, indicam os valores médios de dureza, próximo de 35, conforme indicado nos histogramas da Figura 23 e na Tabela 7 são apresentados os parâmetros estimados para as três distribuições representadas na Figura 23, assim como os valores médios dos IEs correspondentes a cada superfície e o coeficiente de variação dos dados. Salienta-se que nesta análise foram eliminados os outliers por meio de um teste de normalidade. Enquanto que, por fim, as regiões com tons de amarelo, que se apresentam em menor frequência de dados, indicam os locais que apresentaram os maiores picos de dureza, com valores de IE superiores a 45.

De acordo o item 2.2 a análise geoestatística é outra possibilidade de estudar a distribuição dos dados, avaliando as características da distribuição em relação a localização espacial das propriedades, assim como a continuidade e a anisotropia durante o tratamento dos dados. Através do semivariograma é possível representar graficamente a dependência espacial de dados medidos sobre uma superfície no espaço separados por uma distância “h”, sendo, portanto, a ferramenta responsável por definir o grau de significância da dependência espacial dos dados.

Com o auxílio do RStudio, e dos pacotes de geoestatística disponíveis dentro do software, foi possível por meio da linguagem de programação R, construir os semivariogramas experimentais e realizar o ajuste teóricos de cada superfície. Os gráficos gerados podem ser visualizados na Figura 26, enquanto a Tabela 8 traz o resumo dos parâmetros encontrados nos semivariogramas.

Figura 26 - Semivariogramas Brita 1



Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 - Resumo dos parâmetros dos Semivariogramas da Brita 1

Face	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (cm)	Alcance Real (cm)
B1FI ¹	13,63	23,73	15,81	47,43
B1FI ²	16,82	16,82	11,16	33,48
B1FS ¹	9,72	5,49	2,79	8,37
B1FS ²	10,05	8,55	6,51	19,53

Fonte: Elaboração própria

Conforme o apresentado pelos semivariogramas da Figura 26, o efeito pepita apresentado para as faces inferiores foi em média de 15,22, enquanto que para as superfícies superiores o efeito pepita médio é de 9,89. Por mais que se observe uma grande variação neste parâmetro, não se pode garantir estatisticamente que haja diferença entre eles (com 95% de

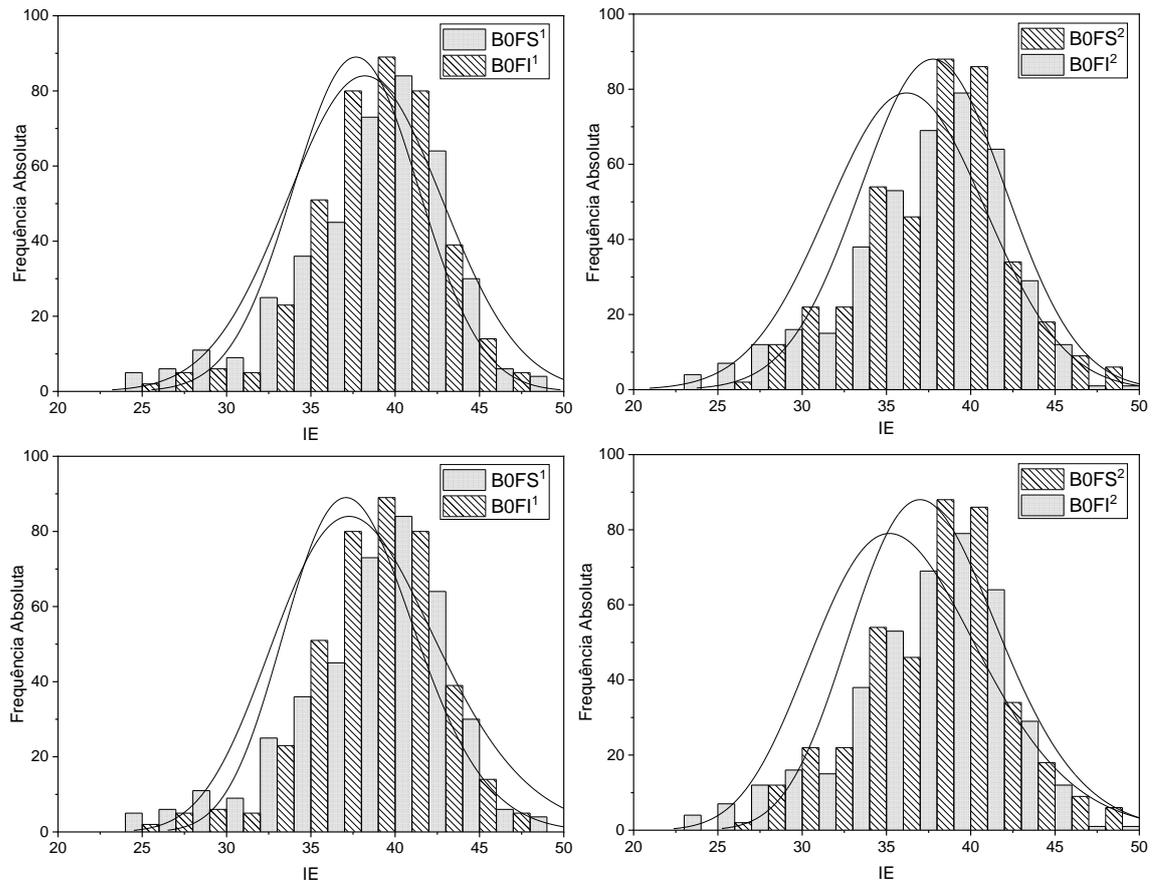
confiança). Em relação ao patamar e ao alcance, também não existe diferença significativa entre as superfícies superiores e inferiores.

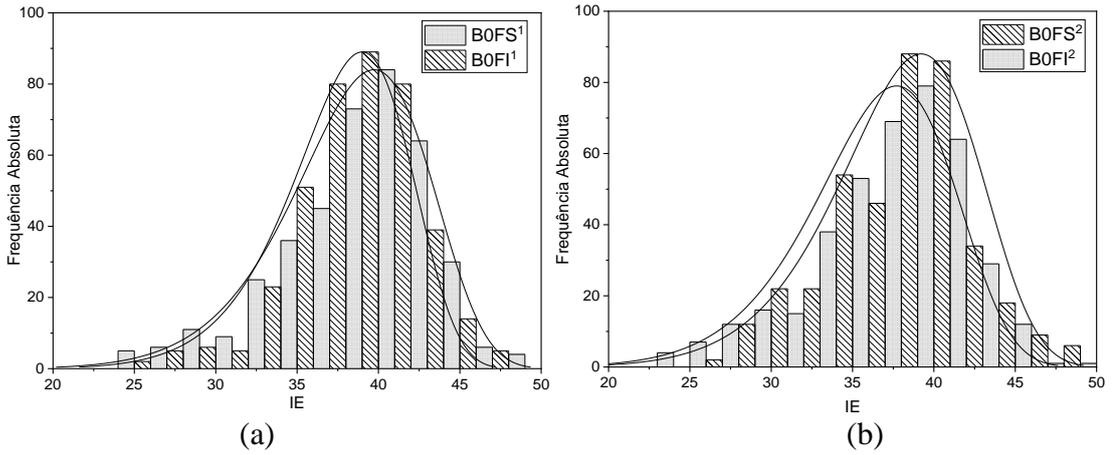
Uma vez que os semivariogramas experimentais foram ajustados pelo modelo teórico exponencial, o alcance real é obtido multiplicando o valor gráfico pelo fator de multiplicação, que nesse caso possui valor 3, sendo por tanto, o alcance real médio é 13,95 cm e 40,46 cm.

4.2.2 Brita 0 e 2

Assim como realizado para as placas com brita 1, foram gerados gráficos de histogramas a partir dos valores de IEs, para determinar a distribuição de frequência dos dados de cada uma das superfícies de ambas as placas, com brita 0 e com brita 2. Os gráficos são exibidos na Figura 27 e Figura 28, respectivamente.

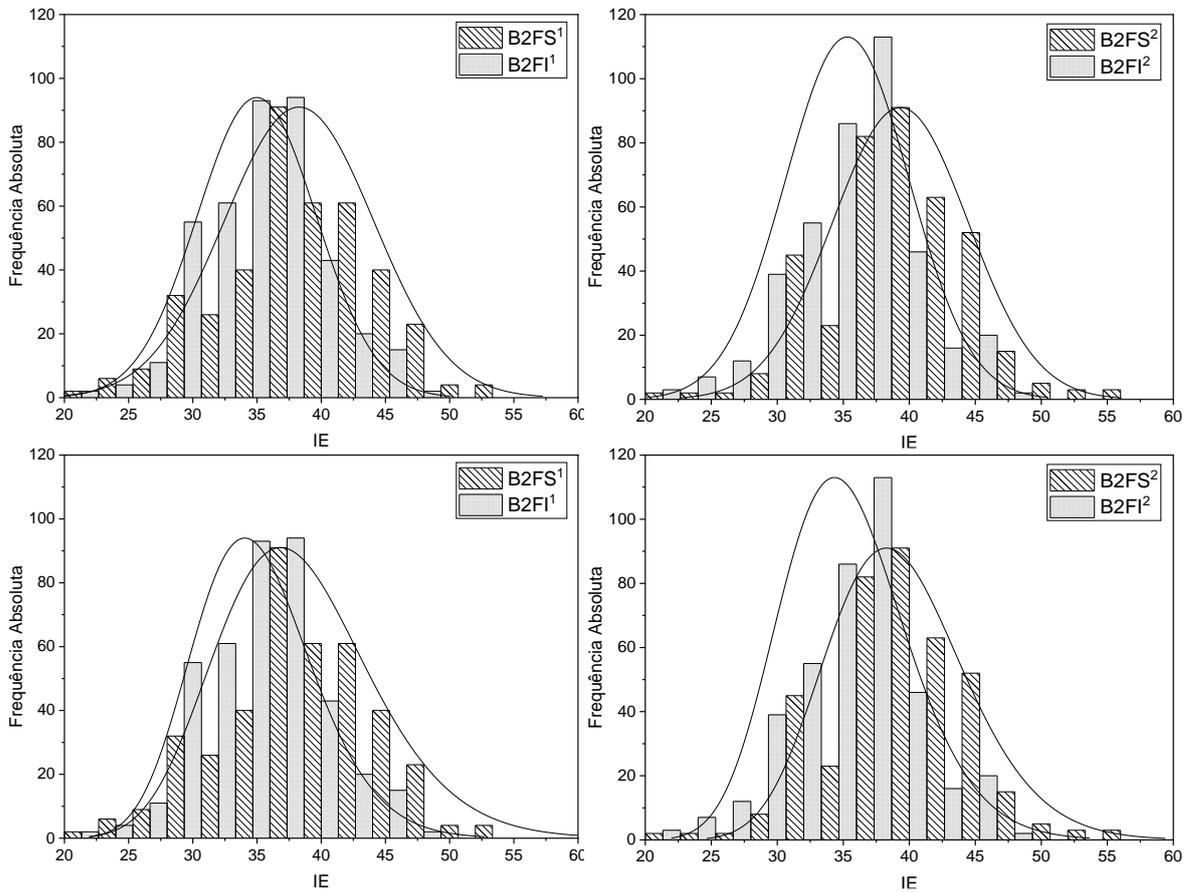
Figura 27- Histogramas com distribuição Normal, Lognormal e Weibull para Brita 0 (a) placa 01e (b) placa 02

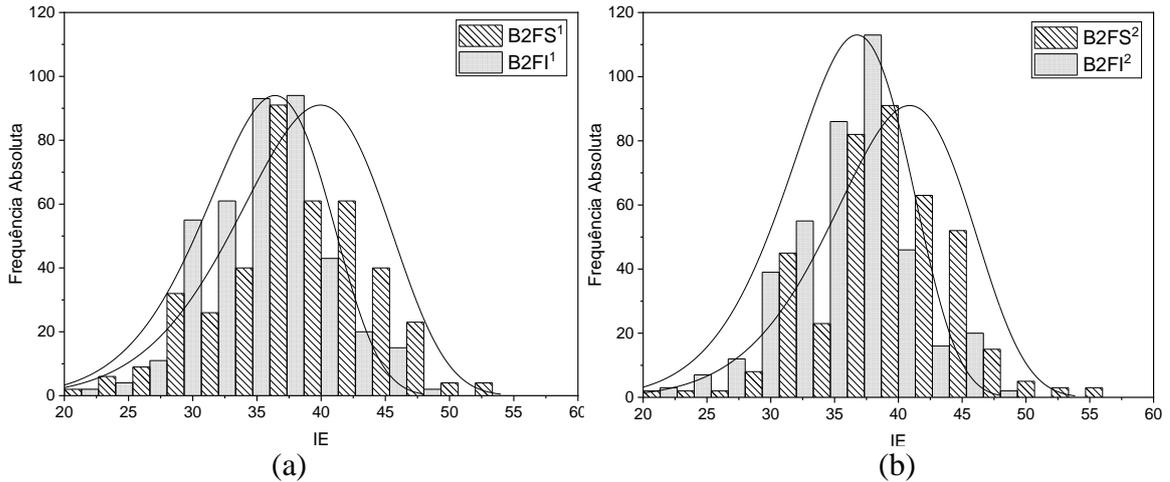




Fonte: Elaboração própria

Figura 28- Histogramas com distribuição Normal, Lognormal e Weibull para a Brita 2 (a) placa 01 e (b) placa 02





Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 9 são apresentados os parâmetros estimados para as três distribuições representadas na Figura 27 e na Figura 28, assim como os valores médios dos IEs correspondentes a cada superfície e o coeficiente de variação dos dados. Destaca-se que para a realização da análise foram eliminados os outliers a partir de um teste de normalidade.

Tabela 9 - Dados estatísticos dos IEs para Brita 0 e Brita 2

Placa de Concreto	Média (MPa)	CV (%)	Normal		Lognormal		Weibull	
			Location um	Scale sigma	Location um	Location um	Scale sigma	Location um
B0FS ¹	37.97	11.75	38.196	4.606	3.635	0.129	40.131	10.163
B0FS ²			37.762	4.309	3.625	0.118	39.652	9.749
B0FI ¹	36.93	11.64	37.677	3.727	3.624	0.103	39.304	11.510
B0FI ²			36.195	4.689	3.580	0.139	38.153	9.467
B2FS ¹	38.796	14.24	38.268	5.836	3.632	0.160	40.736	7.417
B2FS ²			39.328	5.146	3.663	0.135	41.567	8.077
B2FI ¹	35.139	13.24	34.975	4.629	3.546	0.134	37.011	8.022
B2FI ²			35.303	4.677	3.555	0.137	37.328	8.304

Fonte: Elaboração própria

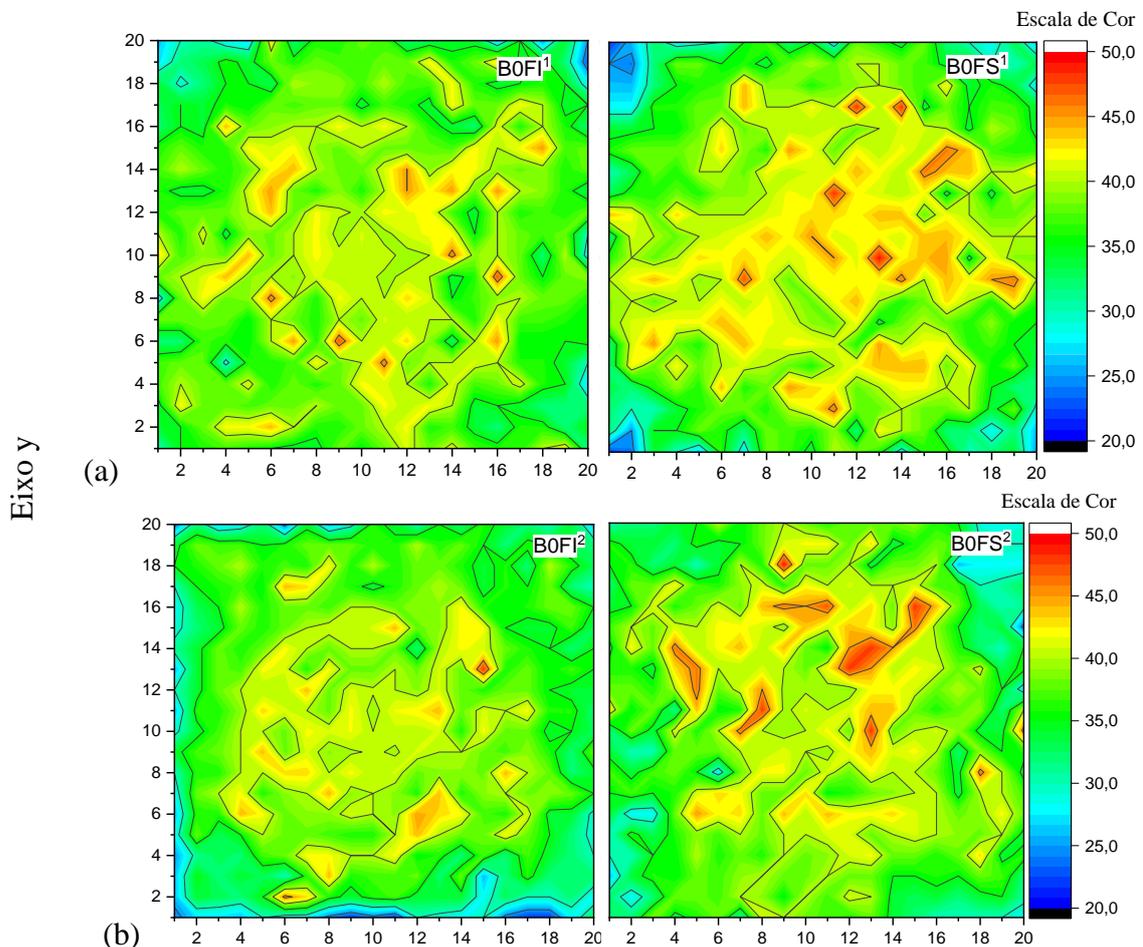
Juntando todas as medições realizadas nas faces superiores para a brita 0, logo todas as medições realizadas nas faces inferiores, e repetindo isto para a brita 2, realizou-se uma análise estatística onde se obteve que para a brita 0 existe diferença entre medir uma superior e inferior. Sendo que o IE médio para as faces superiores é 37,97 e para a faces inferiores 36,96. Aqui se observa uma alteração em relação à brita 1, onde a face inferior era mais resistente que a

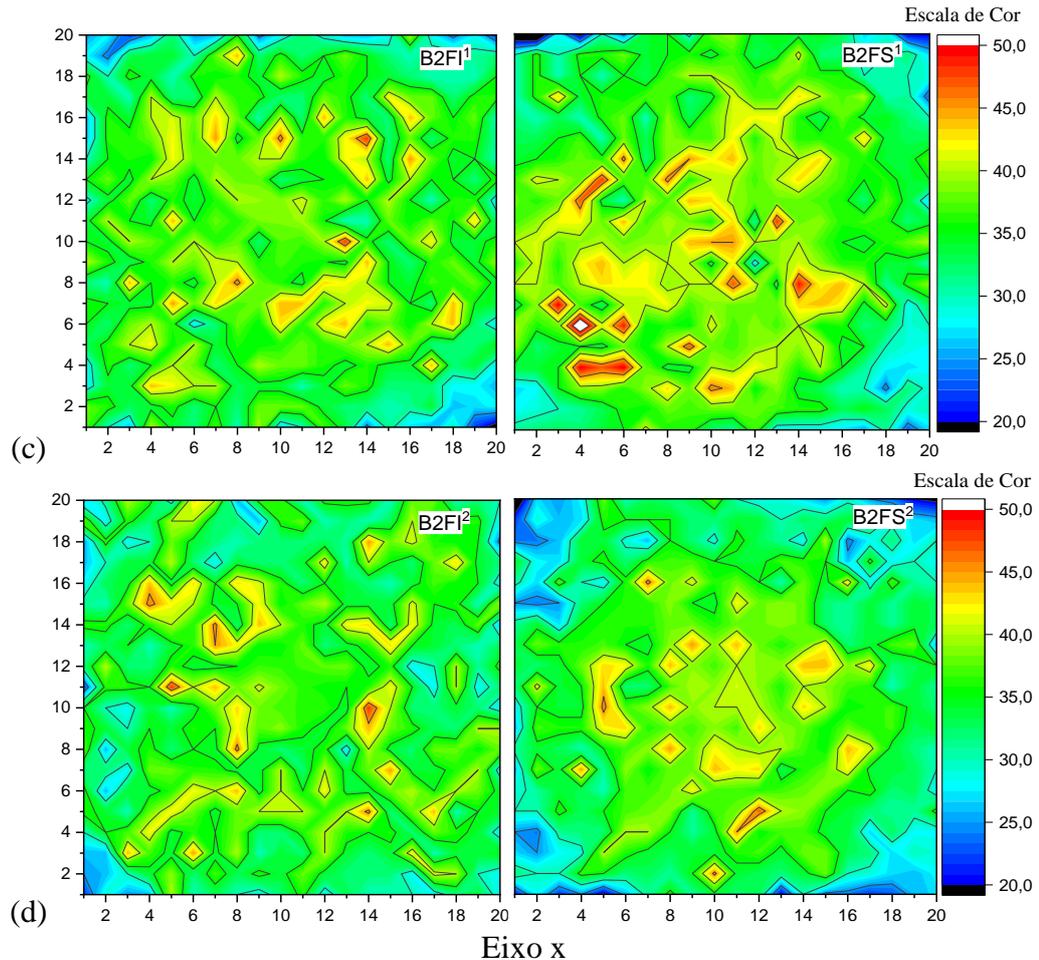
superior. Já quando se analisa a brita 2 não se encontrou diferença significativa entre as medições nas duas faces, encontrando em média 38,796 e 35,139 respectivamente.

Analisando aqui a diferença estatística entre os parâmetros de localização (μ e α) das curvas de distribuição normal, log-normal e Weibull, encontra-se mudança significativa da superfície superior para a inferior. Já os parâmetros de escala (σ) das distribuições normal e lognormal e o parâmetro de forma (β) da distribuição de Weibull não variam significativamente. Como se tem apenas 2 amostras para cada caso, a variação deve ser muito evidente para que ela seja significativa.

Quanto ao comportamento espacial dos dados, os mapas de contorno das superfícies de ambas as placas foram gerados, tanto para a brita 0 como para a brita 2, e podem ser visualizados na Figura 29, abaixo. Eles possibilitam a melhor visualização do comportamento da distribuição dos IEs ao longo do campo analisado, complementando as informações obtidas por meio dos histogramas de frequência da Figura 27 e Figura 28.

Figura 29 - Mapa de contorno para Brita 0 (a) placa 01 e (b) placa 02 e para Brita 2 (c) placa 1 e (d) placa 2.





Fonte: Elaboração própria

Conforme pode ser analisado nos mapas de contorno da Figura 29 – (a) e da Figura 29 – (b), devido as distâncias entre as linhas de contorno das superfícies B0FI¹, B0FS¹, B0FI² e B0FS², as regiões de dureza possuem formatos bem definidos e com tonalidades mais uniformes, divididas principalmente em tons de azul, verde e amarelo, com a escala de dureza variando do menor ao maior IE, conforme a escala de cor definida no gráfico.

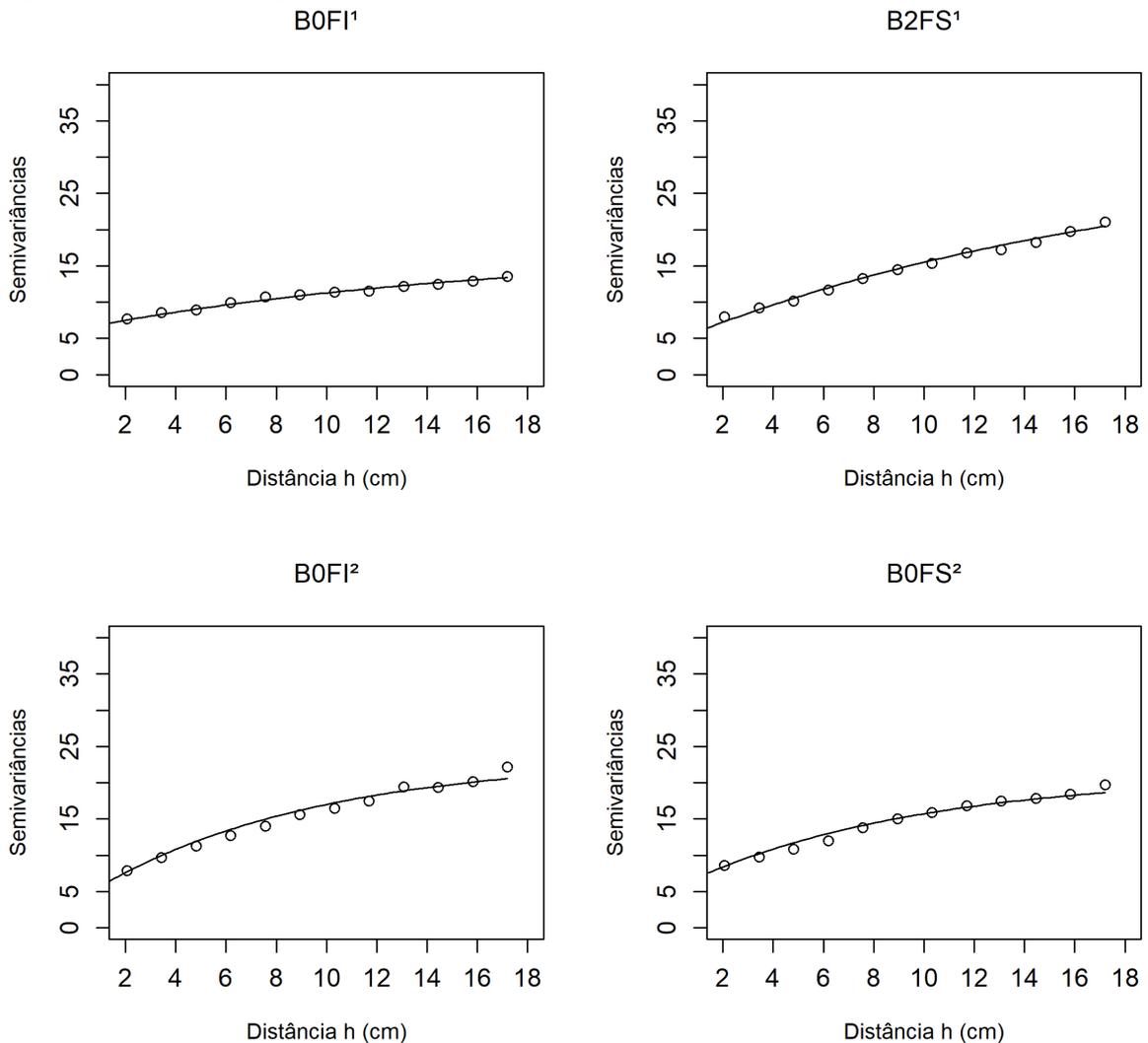
Próximo as arestas das superfícies, o tom de azul claro da escala indica a localização de regiões que concentram os menores índices de dureza, esse comportamento é mais presente nas superfícies B0FS¹, B0FI² e B0FS². Conforme as linhas de contorno vão se afastando das bordas, as regiões vão adquirindo tons de verde escuro, verde claro, e por fim, dispersos na região central, microrregiões em tons de amarelo, o que de acordo com a escala de cor, representa em termos de dureza, que conforme as linhas se aproximam da região central da superfície, os valores de índices de dureza vão aumentando.

As superfícies ilustradas na Figura 29 – (c) e na Figura 29 – (d), apresentaram um comportamento muito próximo ao exibido na Figura 29 – (a) e da Figura 29 – (b), no que tange a concentração de índices esclerométricos mais elevados na região central. No entanto, os

mapas de contorno dessas superfícies revelaram um número maior de linhas de contorno, e portanto, apontam uma variação acentuada nos valores de dureza superficial. A principal diferença entre a Figura 29 – (c) e Figura 29 – (d) está basicamente relacionada aos níveis de dureza localizados na região próxima as bordas das superfícies. Percebe-se através da escala de cores, que as amostras B2FI² e B2FS² apresentaram uma quantidade maior de regiões que correspondem a tonalidade azul/azul claro, quando comparado com as superfícies B2FI¹ e B2FS¹, o que justifica a maior variação de dados entre as placas 1 e 2, indicando uma maior influência no confinamento das paredes no caso da placa número 2.

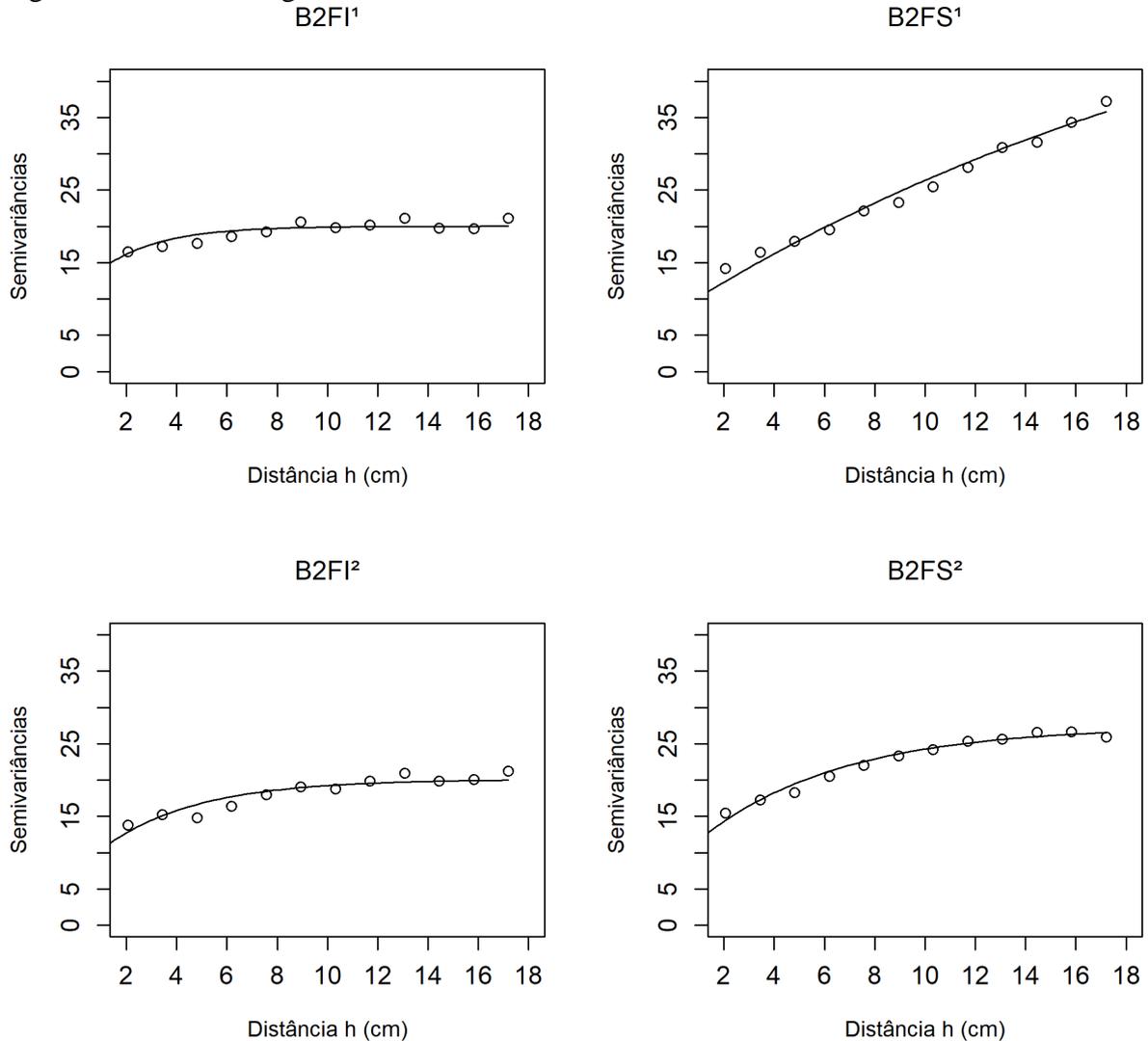
Para avaliar a distribuição dos índices de dureza em relação a localização espacial das propriedades e o grau de significância da dependência espacial dos dados, foram construídos os semivariogramas de cada superfície, que podem ser visualizados na Figura 30 e Figura 31, para a brita 0 e brita 2, respectivamente.

Figura 30 - Semivariogramas Brita 0



Fonte: Elaboração própria

Figura 31 – Semivariogramas Brita 2.



Fonte: Elaboração própria

A partir dos dados dos semivariogramas da Figura 30 e Figura 31, que estão resumidos na Tabela 10, não se encontrou diferença significativa entre as superfícies inferiores e superiores em nenhum dos parâmetros, tanto para a brita 0 quanto para a brita 2, com grande dispersão dos resultados.

Desta forma se poderia supor que um mesmo semivariograma representa a distribuição dos IE da brita 0. Desta forma adotou-se a média de todos os parâmetros para definir este semivariograma teórico: Efeito pepita com semivariância de 5,23, patamar correspondente a uma semivariância de 18,93 para um alcance de 14,76 cm e alcance real de 44,28 cm. O mesmo acontece com a brita 2, encontrando assim efeito pepita com valor de semivariância igual a 8,73, patamar com uma semivariância igual a 24,48 para um alcance de 9,41 cm e, portanto, com alcance real de 28,23 cm.

Tabela 10 - Resumo dos parâmetros dos Semivariogramas da Brita 0 e Brita 2

Face	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (cm)	Alcance Real (cm)
B0FI ¹	6,23	10,99	16,27	48,81
B0FI ²	4,80	22,19	14,41	43,23
B0FS ¹	4,56	26,78	19,06	57,18
B0FS ²	5,33	15,78	9,3	27,9
B2FI ¹	10,87	9,15	2,32	6,96
B2FI ²	7,47	12,64	3,72	11,16
B2FS ¹	8,05	57,38	26,03	78,09
B2FS ²	8,65	18,75	5,58	16,74

Fonte: Elaboração própria

4.2.3 Comparação dos Resultados

A pesar da resistência média do concreto diminuir com a dimensão máxima característica da brita (ver Figura 22), isto não pode ser garantido estatisticamente. Foi demonstrado que estatisticamente não existe diferença entre as resistências a compressão axial. Além disto os IE foram medidos em tempos diferentes e com calibrações diferentes, e portanto, não podem ser comparadas entre si diretamente. Desta forma as seguintes comparações não serão feitas em função do valor do IE, mas sim em relação a sua distribuição e comparação entre as faces.

A Tabela 11 apresenta os valores médios de dureza superficial normalizados em relação ao IE médio de cada tipo de brita, e coeficiente de variação dos dados para as superfícies inferiores e superiores das placas produzidas com brita 0, brita 1 e brita 2. Também se apresenta na tabela os parâmetros da distribuição tipo Weibull, pois a forma da mesma que melhor se adequou a todas as superfícies analisadas, como se pode ver Figura 23, Figura 27 e Figura 28.

Através da Tabela 11 foi possível elaborar os gráficos da Figura 32 e Figura 33, que permitem uma análise mais clara dos dados. Se for analisada somente a superfície inferior o IE médio diminui com a dimensão máxima característica da brita, mas quando analisada a superfície superior varia de forma arbitrária. O concreto realizado com Brita 0 a superfície superior é mais resistente que a inferior. Para o concreto com brita 1, houve mudança de

comportamento, sendo a face inferior, mais resistente que a face superior. Para o concreto com Brita 2 de novo a superfície superior é mais resistente que a inferior.

Tabela 11 - Dados estatísticos dos IEs para Brita 0, Brita 1 e Brita 2.

Placa de Concreto	Média	Media total	Média Normalizada	CV (%)	Weibull	
					Scale sigma	Location um
B0FS ¹	37.97	37.45	1.014	11.75	1.072	10.163
B0FS ²					1.059	9.749
B0FI ¹	36.93	37.45	0.986	11.64	1.050	11.510
B0FI ²					1.019	9.467
B1FS ¹	31.446	33.419	0.941	13.76	0.951	7.441
B1FS ²					1.039	8.368
B1FI ¹	35.392	33.419	1.059	14.83	1.111	7.332
B1FI ²					1.141	7.020
B2FS ¹	38.796	36.968	1.049	14.24	1.102	7.417
B2FS ²					1.124	8.077
B2FI ¹	35.139	36.968	0.951	13.24	1.001	8.022
B2FI ²					1.010	8.304

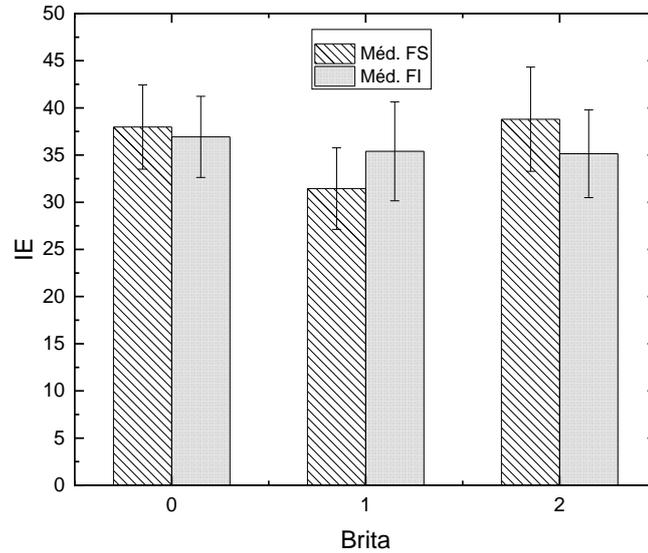
Fonte: Elaboração própria

Uma condição presente no ensaio experimental pode explicar porque se dá a diferença no comportamento das resistências da brita 1, quando comparado com a brita 0 e brita 2. Mesmo com a trabalhabilidade adequada da mistura e com a utilização da mesa vibratória no adensamento do concreto, isso não foi o suficiente para garantir que o concreto ficasse com a superfície superior perfeitamente regular. Mesmo depois de curado o concreto, a utilização da pedra de desbaste, parte integrante do esclerômetro, que tem como função justamente a regularização das superfícies ensaiadas, não foi o suficiente para permitir uma completa regularização. Isso fez com que durante a execução das leituras nas superfícies superiores, existissem regiões onde o posicionamento do esclerômetro não ocorria de forma ideal.

O parâmetro sigma da distribuição de Weibull depende da posição da média. Como para esta análise é normalizada a média não se espera variação no mesmo. Porém o parâmetro mu muda com o tipo de brita. Existe diferença significativa no parâmetro mu para a brita 0, porém para as britas 1 e 2 não se encontrou variação. Cabe salientar que como comentado

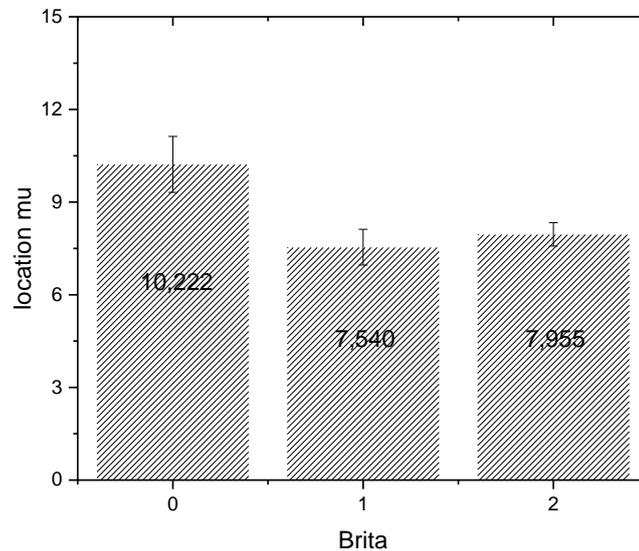
anteriormente não tem diferença significativa entre os valores encontrados na superfície superior e inferior.

Figura 32 – Média de IEs para as superfícies inferiores e superiores para os diferentes tipos de brita



Fonte: Elaboração própria

Figura 33 – Média do parâmetro “mu” em relação aos diferentes tipos de brita



Fonte: Elaboração própria

Em resumo, podemos considerar que os valores do IE seguem uma distribuição tipo Weibull sendo esta igual para a superfície superior e inferior independentemente do tipo de brita utilizada. O parâmetro de escala sigma desta distribuição está relacionada com o valor médio do IE encontrado que por sua vez está relacionado com a resistência a compressão axial

do concreto. Como não encontramos diferença estatisticamente relevante entre as resistências dos concretos podemos estimar que o valor do parâmetro sigma é o mesmo para este três concretos analisados. O valor do parâmetro de escala mu da distribuição de Weibull varia sim com o tipo de brita utilizado. Quando se tem brita 0 no concreto este parâmetro vale em média 10,22. Quando se usa brita 1 ou brita 2 este parâmetro pode ser considerado 7,75.

Para analisar os parâmetros do semivariograma, a Tabela 12 apresenta juntos todos os parâmetros encontrado. Fazendo uma análise de variância de duas variáveis (two-way-ANOVA) considerando o efeito pepita, se encontrou com 95% de confiança que a mudança da brita é significativa e a superfície onde é calculada também. Porém não há interação entre estes dois efeitos.

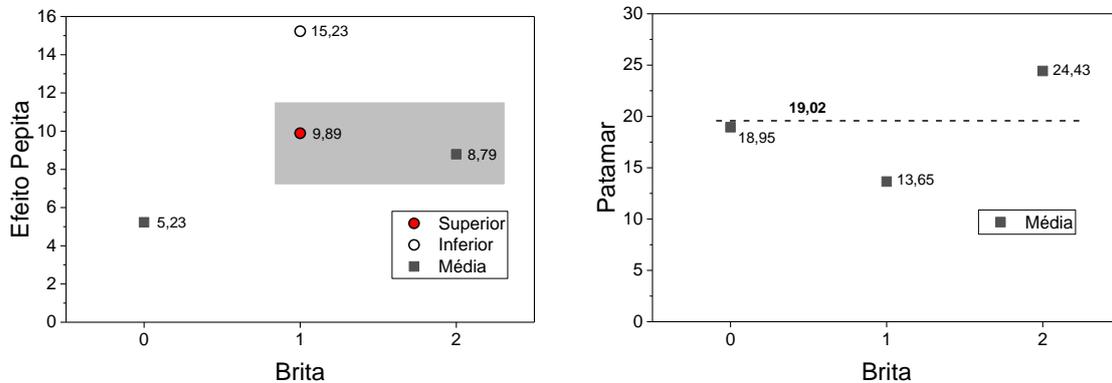
Tabela 12 – Resumo dos parâmetros do semivariogramas para Brita 0, Brita 1 e Brita 2

Face	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (cm)	Alcance Real (cm)
B0FI ¹	6,23	10,99	16,27	48,81
B0FI ²	4,80	22,19	14,41	43,23
B0FS ¹	4,56	26,78	19,06	57,18
B0FS ²	5,33	15,78	9,3	27,9
B1FI ¹	13,63	23,73	15,81	47,43
B1FI ²	16,82	16,82	11,16	33,48
B1FS ¹	9,72	5,49	2,79	8,37
B1FS ²	10,05	8,55	6,51	19,53
B2FI ¹	10,87	9,15	2,32	6,96
B2FI ²	7,47	12,64	3,72	11,16
B2FS ¹	8,05	57,38	26,03	78,09
B2FS ²	8,65	18,75	5,58	16,74

Fonte: Elaboração própria

Analisando o efeito pepita pode se ver que estatisticamente, com 95% de confiança para a brita 0, não há diferença da superfície medida, dando em média 5,23. Para a brita 2 também não há diferença com a superfície sendo o valor médio do alcance 8,79. Para a brita 1 se tem sim diferença entre a superfície, sendo o valor da superfície superior 9,89 e da inferior 15,23. Também se observou que entre a superfície superior da brita 1 e a brita 2 não houve diferença (marcado em cinza na Figura 34).

Figura 34 – Valores médios de efeito pepita e patamar em relação aos diferentes tipos de brita

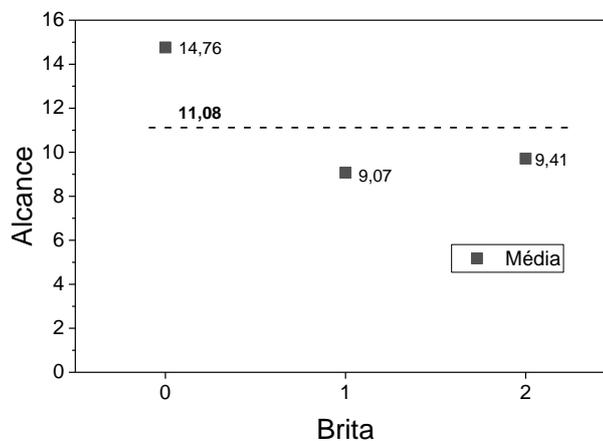


Fonte: Elaboração própria

Analisando o patamar, não existe diferença significativa entre a brita utilizada nem na superfície analisada. Desta forma o patamar para o concreto, independente da brita utilizada, e tem valor médio de 19,02 com um CV de 72,2%, uma grande dispersão como se pode observar.

A mudança do alcance segue a mesma variação que a mudança do patamar, não existindo diferença nos resultados com nenhuma das duas variáveis. Desta forma, a pesar de ter grande variação, independente da brita utilizada o alcance do concreto é 11,08 cm em média, com um CV de 66,7%. Resultado coerente com o apresentado anteriormente com relação ao patamar, uma vez que o patamar representa a semivariância correspondente ao alcance definido pelo semivariograma. Na Figura 35 é possível analisar graficamente a variação do alcance em função do agregado graúdo utilizado.

Figura 35 – Valores médios de alcance com relação aos diferentes tipos de brita



Fonte: Elaboração própria

4.3 Cubos de concreto

No estudo da influência do carregamento na leitura dos índices de dureza do concreto C50 e na distribuição espacial das propriedades mecânicas do material, amostras cúbicas de concreto foram produzidas com agregado graúdo, brita 1. Conforme descrito na

Tabela 13, a nomenclatura utilizada nesse caso consistiu em identificar o cubo ensaiado, a face ensaiada, o patamar de carregamento correspondente a face e a condição de confinamento, criada pela interface do concreto com a forma.

Tabela 13 - Nomenclatura dos Cubos

	Face	Patamar de Carregamento (%)	Nomenclatura	
Amostra	Superior	0	S00 ^x	
	Inferior	0	I00 ^x	
		0	L00 ^x	
	Lateral		50	L50 ^x
			60	L60 ^x
			75	L75 ^x

*x refere-se ao número da amostra

Fonte: Elaboração própria

Onde as diferenças entre a face I00 e L00, consistem na direção do lançamento do concreto e na forma como o ensaio foi executado, ambas estão em condição de confinamento devido ao contato da face com a forma metálica, sendo a face I00 com o fundo da forma enquanto a L00 com a lateral, sendo, portanto, à direção do lançamento do concreto ortogonal a face I00 e paralela a L00.

Os índices esclerométricos lidos em cada face são fornecidos em sua totalidade no APÊNDICE A – Dados de Índices Esclerométricos podem ser visualizados de forma resumida na Tabela 14. Cabe salientar que, devido a experiência prévia na execução das leituras de índices esclerométricos realizados nas placas de concreto, optou-se na hora da execução das leituras nos cubos por fazê-las a partir de dois centímetros da borda, afim de evitar que as amostras fossem danificadas durante o ensaio, definindo-se assim uma malha retangular de 11x11 cm, totalizando 121 leituras por face.

Tabela 14 - Índices Esclerométricos

Face	Média	CV (%)	Médias
IP00 ¹	31.403	15.63	31.119
IP00 ²	30.835	10.99	
SP00 ¹	32.457	15.91	33.132
SP00 ²	33.808	14.38	
LP00 ¹	35.850	11.09	35.179
LP00 ²	34.508	16.23	
LP50 ¹	44.512	8.63	45.144
LP50 ²	45.776	6.87	
LP60 ¹	45.006	7.12	44.429
LP60 ²	43.852	8.45	
LP75 ¹	44.698	7.83	45.853
LP75 ²	47.009	8.09	

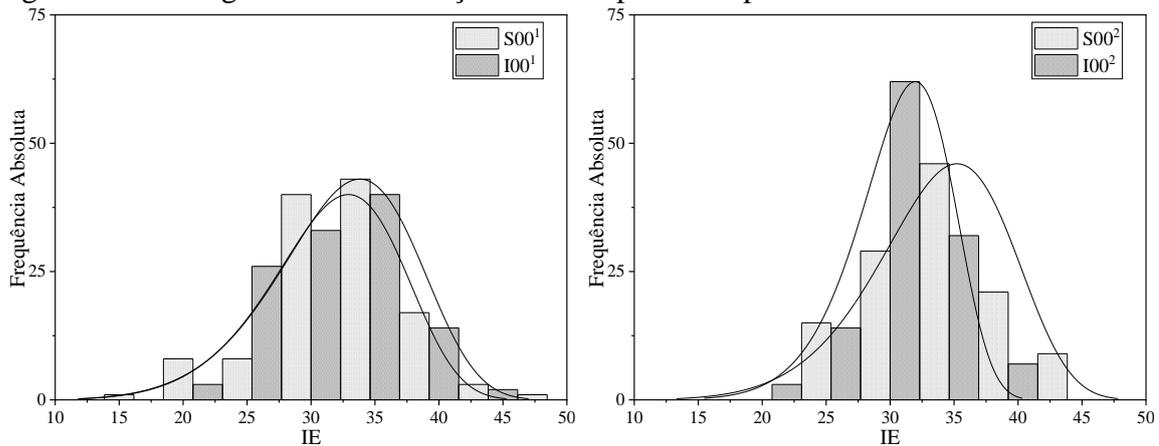
Fonte: Elaboração própria

4.3.1 Comparação entre medidas de cubo e placas

Na Tabela 14 os resultados obtidos mostram que entre a superfície superior (IE médio = 33.13) e a inferior (IE médio = 31.12) apresentam uma diferença significativa de IE médio de 2,01. Efeito contrário ao encontrado com as placas, superfície superior tem um IE médio de 31,45 e o inferior 35,39, porém o mesmo encontrado para a brita 0 e brita 2. Isso corrobora mais uma vez para imaginar que as placas de concreto com brita 1 tiveram seus resultados influenciados pela irregularidade de face superior, uma vez que as amostras cúbicas não apresentaram esse problema de regularização.

A Figura 36 exibe os histogramas e o ajuste da distribuição Weibull para as superfícies inferior e superior dos cubos. Não se observou diferença significativa no parâmetro beta com a superfície medida. O mesmo resultado foi observado com as placas de brita 1. Também não houve diferença significativa deste parâmetro entre a placa e o cubo. Assim, podemos concluir que a distribuição definida para a placa (beta igual a 7.75) pode representar a distribuição encontrada nos cubos. Na Tabela 15 é possível verificar o resumo desses parâmetros normalizados.

Figura 36 – Histogramas e distribuição Weibull para as superfícies S00 e I00



Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 - Dados estatísticos dos IEs para as superfícies S00 e I00

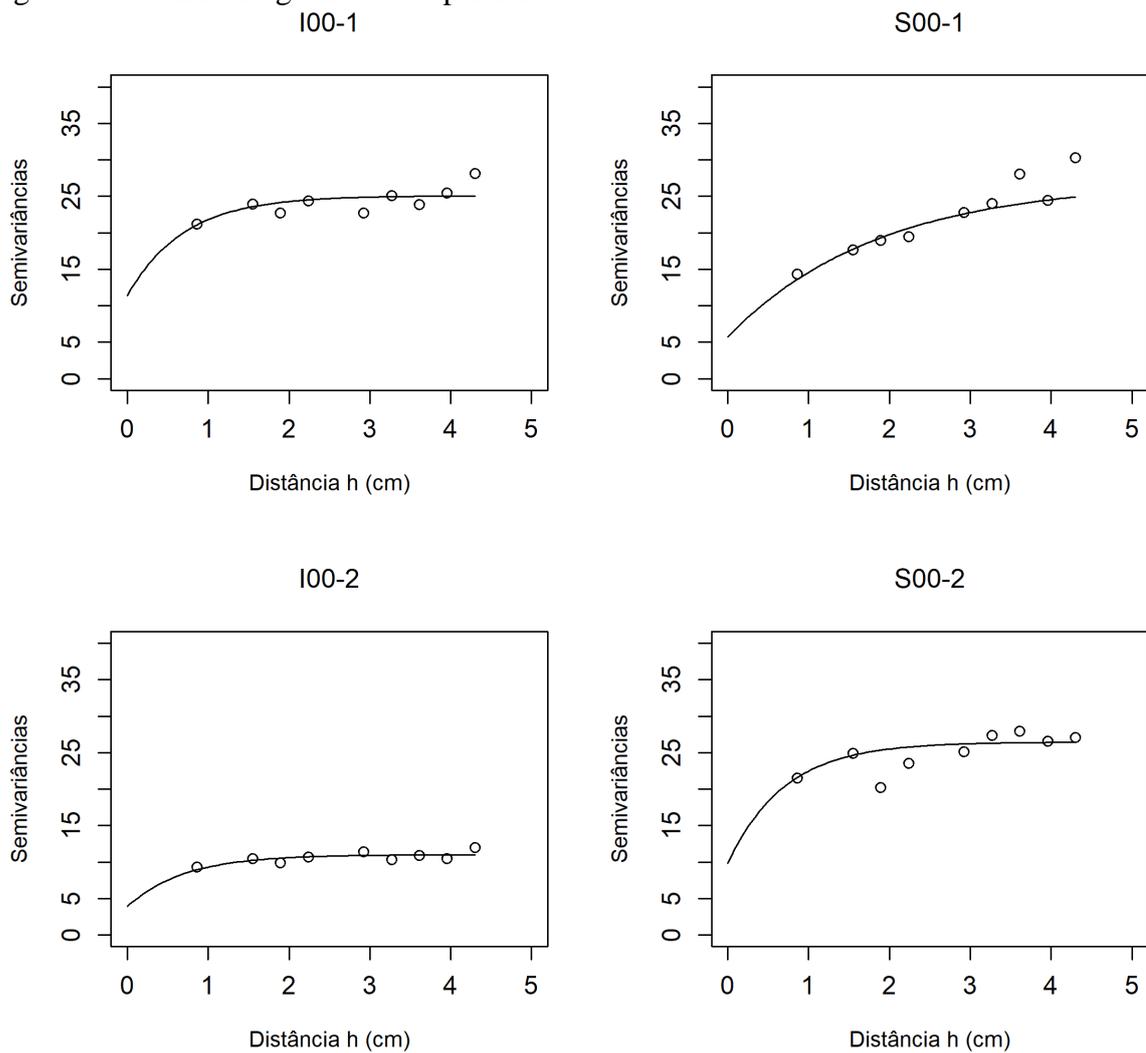
Placa de Concreto	Média (MPa)	Media total (MPa)	Média Normalizada	CV (%)	Weibull	
					Scale alpha	Shape beta
IP00 ¹	31.119	32.126	0.969	13.31	33.656	7.035
IP00 ²					32.33	9.511
SP00 ¹	33.132	32.126	1.031	15,15	34.61	6.821
SP00 ²					35.94	7.320

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 37 é possível visualizar o semivariogramas das superfícies inferiores e superiores dos cubos e na Tabela 16 encontram-se os parâmetros dos semivariogramas, de forma resumida.

Não se observa diferença significativa entre as faces superiores e inferiores dos cubos em relação ao alcance real. No entanto quando comparado com os valores de alcance real definidos para as placas, percebe-se que para as placas o alcance real apresentou valores numa ordem bem superior de comprimento. Quanto aos demais parâmetros não se observou diferença significativa quando comparado os resultados encontrados para os cubos e placas de concreto.

Figura 37 – Semivariograma das superfícies S00 e I00



Fonte: Elaboração própria

Tabela 16 – Resumo dos parâmetros dos semivariogramas superfícies S00 e I00

Face	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (cm)	Alcance Real (cm)
I00 ¹	10,67	15,66	1,54	4,61
I00 ²	6,75	4,23	2,57	7,69
S00 ¹	8,22	23,75	2,83	8,47
S00 ²	6,72	19,43	1,03	3,085

Fonte: Elaboração própria

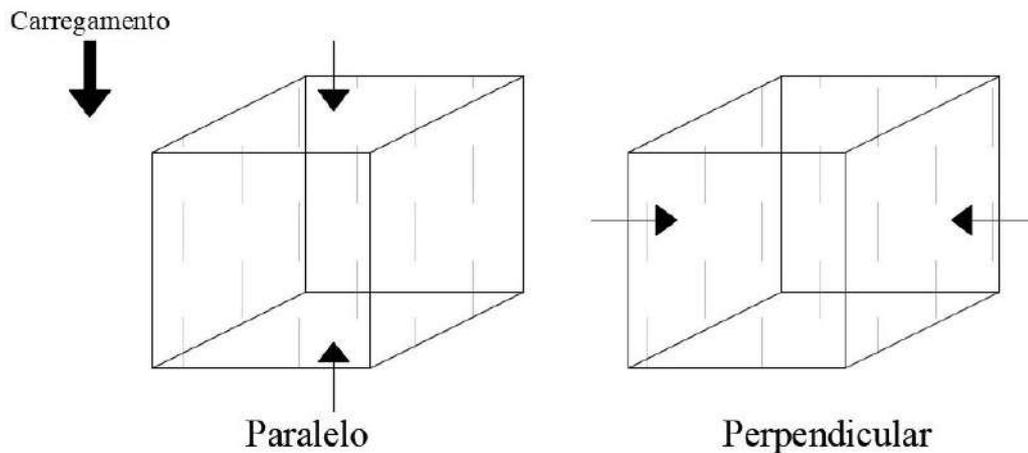
4.3.2 Direção do Lançamento

Encontrou-se um IE médio medido na lateral dos cubos igual a 35.18, esta medida é perpendicular à direção do lançamento. Quando medidos na superfície superior e inferior esse

resultado é de 33.13 e 31.12, respectivamente, sendo em média 32.13, que é a medida na direção ortogonal ao lançamento. Sendo assim, a relação entre o IE medido em diferentes direções é 1.095. Isto é, os valores médios medidos na direção transversal ao lançamento são 9.5% superiores aos medidos na direção do lançamento. Cabe salientar que trabalho de Kostascki et al. (2019) que analisaram este efeito encontraram uma diferença na ordem de 10% entre as resistências em ambas direções. Porém a resistência maior se dá na direção do lançamento e a menor perpendicular à mesma. Aqui os IE são maiores na direção perpendicular ao lançamento.

Quando se impacta o esclerômetro na direção vertical, as fissuras e vazios que se geram embaixo do agregado, que são horizontais (ver Figura 38 a seguir), abrem e fecham e fazem com que diminua a energia que volta. Já quando se impacta na direção horizontal as fissuras não se mechem, não afetando a resposta. Assim as medições feitas em uma direção podem representar a resistência na direção contrária.

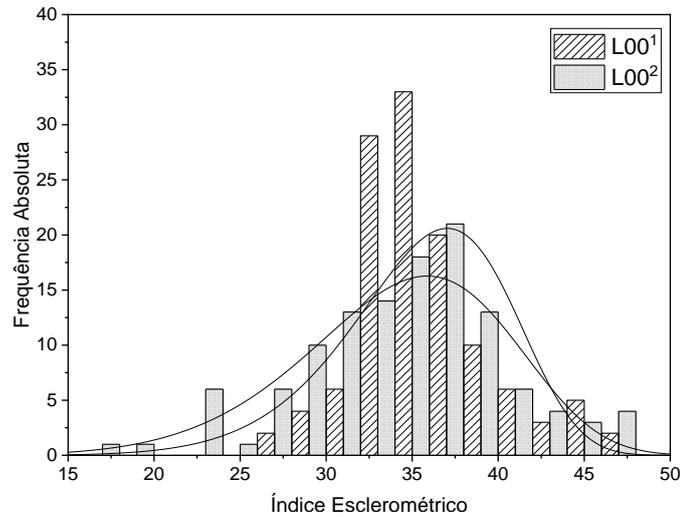
Figura 38 - Aplicação do carregamento paralelo ao lançamento, (b) Aplicação do carregamento perpendicular ao lançamento



Fonte: Elaboração própria

A Figura 39 exibe os histogramas e o ajuste da distribuição Weibull para as superfícies L00, e a seguir, na Tabela 17 é possível verificar o resumo dos parâmetros.

Figura 39 - Histogramas e distribuição Weibull para as faces L00



Fonte: Elaboração própria

Tabela 17 - Dados estatísticos dos IEs para as faces L00

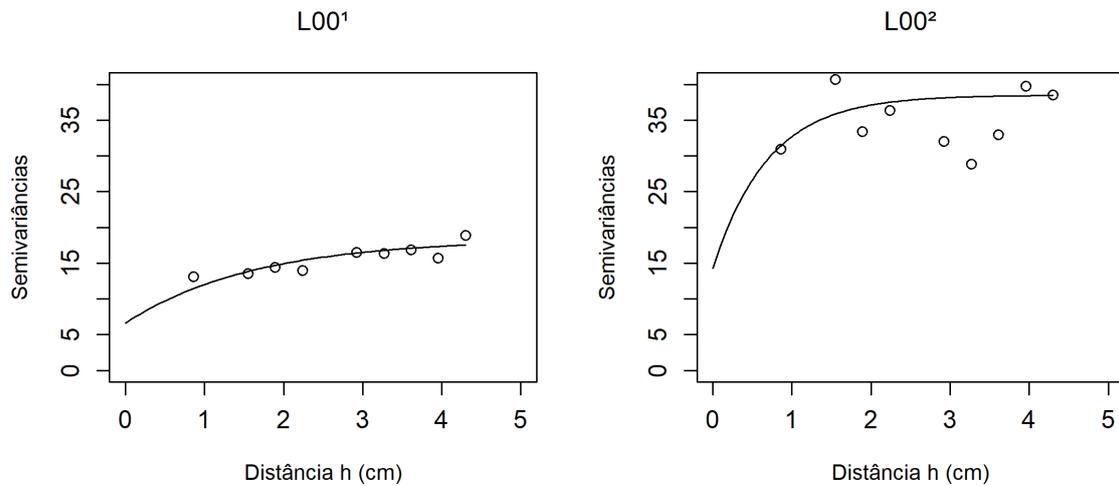
Placa de Concreto	Média (MPa)	Media total (MPa)	Média Normalizada	CV (%)	Weibull	
					Scale alpha	Shape beta
L00 ¹	35.85	35,17	1.019	11,09	37.569	8.630
L00 ²	34.50		0.980	16,23	36.761	6.638

Fonte: Elaboração própria

Quando analisado o parâmetro beta, não se encontra diferença significativa entre os dados das faces S00, I00 e L00. Assim, a distribuição definida para a placa e para as faces S00 e I00 dos cubos (beta igual a 7.75), também pode ser utilizado para definir a face L00, ou seja, o parâmetro não varia em função da direção do lançamento do concreto.

Com relação a distribuição espacial das propriedades, na Figura 40 é possível visualizar os semivariogramas das superfícies L00. Os parâmetros correspondentes a estes semivariogramas são descritos na Tabela 18.

Figura 40 - Semivariograma das superfícies L00



Fonte: Elaboração própria

Tabela 18 – Resumo dos parâmetros dos semivariogramas das superfícies L00

Face	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (cm)	Alcance Real (cm)
L00 ¹	6,63	11,74	1,63	4,88
L00 ²	14,3	24,2	0,70	2,097

Fonte: Elaboração própria

Os parâmetros de semivariograma para as faces L00 indicam uma semelhança com os resultados apresentados pelas faces S00 e I00, tanto em relação ao efeito pepita e patamar, como para o alcance e alcance real. O que sugere que é possível que a distribuição das propriedades não seja influenciada pela direção do lançamento do concreto.

4.3.3 Influência da tensão

Os resultados de IEs obtidos a partir do ensaio não destrutivo de esclerometria, podem ser correlacionados com a resistência à compressão encontrada no ensaio de compressão axial, aqui se utilizou a equação desenvolvida por Machado (2005), descrita no item 3.3.2.1 Correlação com a resistência à compressão para realizar essa correlação. A resistência à compressão encontrada, bem como o coeficiente de variação, pode ser visualizada na Tabela 19. Cabe salientar aqui que se consideraram somente as medições feitas nas faces laterais pois são diretamente comparáveis entre si.

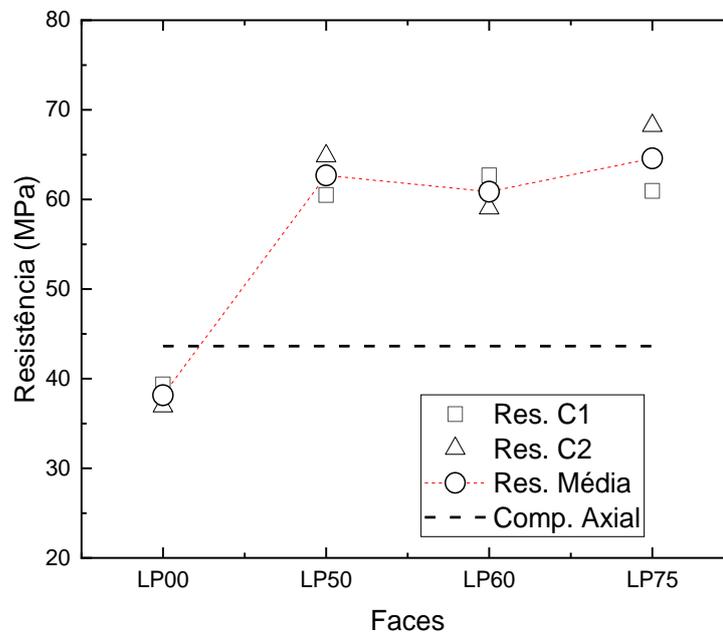
Tabela 19 – Resistência à compressão

Face	Média (MPa)	CV (%)
L00 ¹	39,36	24,33
L00 ²	36,94	33,23
L50 ¹	60,50	20,94
L50 ²	64,86	16,43
L60 ¹	62,69	18,32
L60 ²	59,03	18,58
L75 ¹	60,95	19,22
L75 ²	68,24	17,28

Fonte: Elaboração própria

Através da Figura 41 é possível analisar graficamente o comportamento apresentado pelo material, tanto no ensaio de compressão axial, representado pela linha tracejada, como para a resistência obtida por meio da correlação com os índices esclerométricos, sendo o símbolo quadrado referente a amostra 01 e os símbolos triangulares referentes a amostra 02.

Figura 41 - Relação entre a resistência a compressão no ensaio destrutivo e não destrutivo



Fonte: Elaboração própria

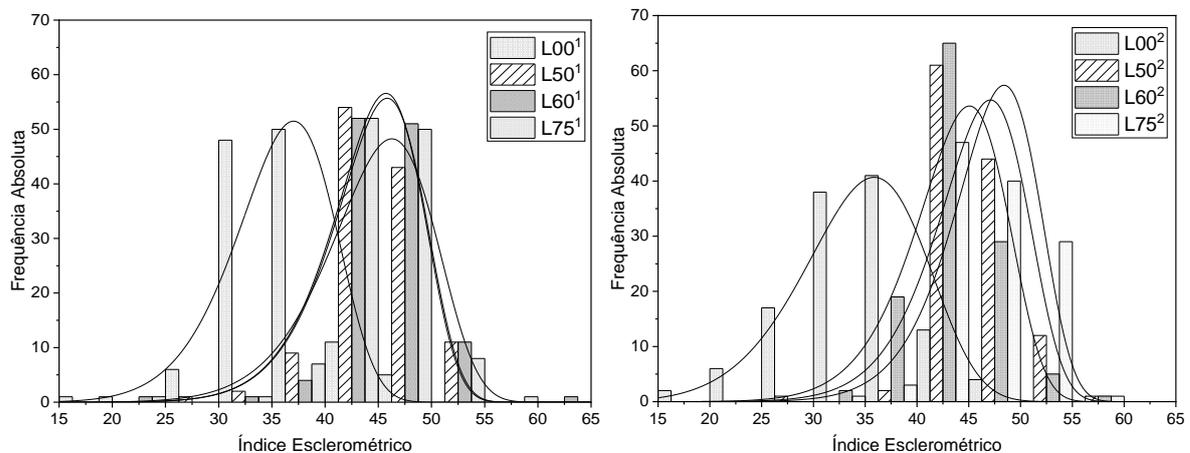
O comportamento apresentado na Figura 41 demonstra que as faces L00 apresentaram os valores de resistência à compressão, pouco inferiores a resistência referência (9,90% abaixo da média obtida no ensaio destrutivo), definida pela média dos corpos de prova ensaiados à

compressão axial. Diferentemente das faces sem carregamento, as superfícies L50, L60 e L75 alcançaram valores de resistência à compressão por meio de correlação, superiores à média indicada no ensaio de compressão axial, na ordem de 48%, 43,80 e 52,55%, respectivamente.

No que tange a comparação com o f_{ck} para o qual foi determinada a dosagem do traço de concreto (50 MPa), percebe-se que considerando a média das resistências obtidas por correlação para as faces sem carregamento, L00, os resultados encontrados foram 23,8% inferior a resistência última esperada; enquanto que a média dos cubo para as faces analisadas sob a influência do carregamento, L50, L60 e L75, os resultados foram de 25,2%, 21,6% e 29%, superiores, respectivamente a resistência última para a qual o concreto foi produzido.

Quanto ao comportamento espacial dos dados em função da condição de carregamento de cada face, o gráfico de histograma gerado a partir dos valores de IEs medidos, permite verificar o comportamento com relação a distribuição de frequência dos dados para cada face analisada. Os histogramas de ambos os cubos podem ser visualizados na Figura 42.

Figura 42 – Histogramas referentes as faces laterais das amostras 1 e 2



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 20 são apresentados os parâmetros estimados referentes a distribuição Weibull, utilizada no ajuste dos histogramas da Figura 42, assim como os valores médios dos IEs correspondentes a cada face e o coeficiente de variação dos dados. Ressalta-se que para análise foram eliminados os outliers através de um teste de normalidade.

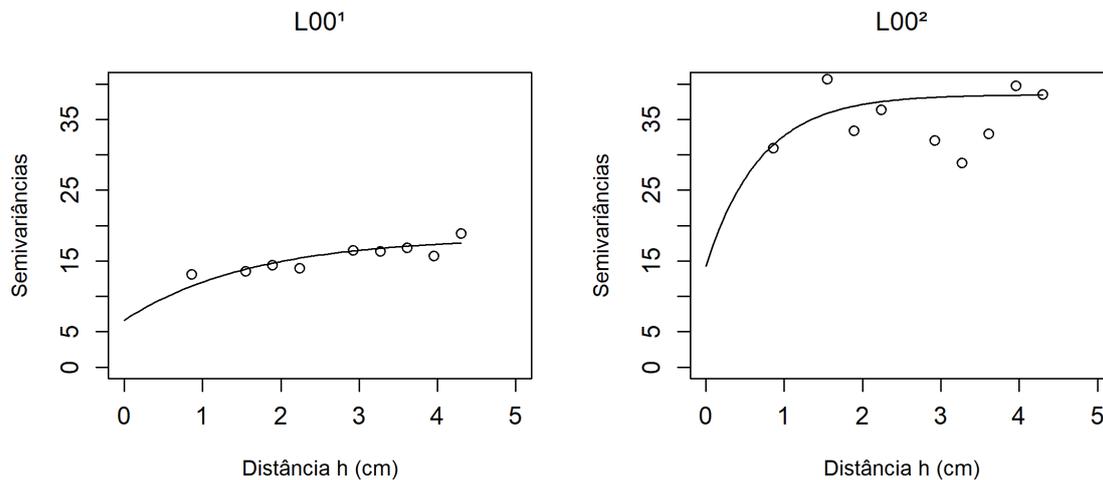
Tabela 20 - Dados estatísticos dos IEs para as faces laterais

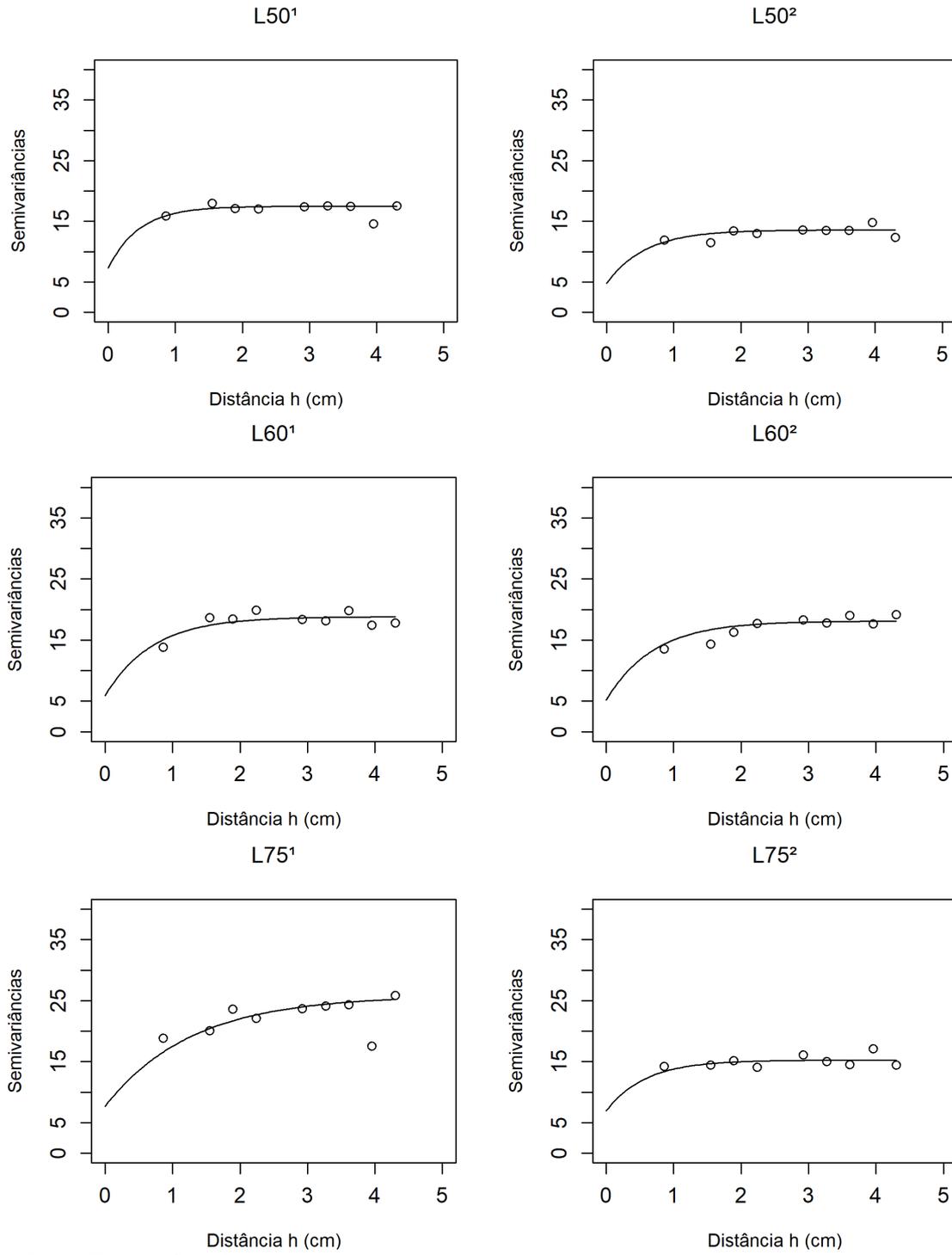
Placa de Concreto	Média (MPa)	Media total (MPa)	Média Normalizada	CV (%)	Weibull	
					Scale alpha	Shape beta
L00 ¹	35.179	35.179	-	13.66	37.569	8.630
L00 ²					36.761	6.638
L50 ¹	45.144		1.00	7.75	46.193	11.608
L50 ²					47.457	11.618
L60 ¹	44.429	45.142	0.984	7.78	46.753	10.084
L60 ²					45.466	10,902
L75 ¹	45.853		1.015	7.96	46.074	11.667
L75 ²					48.725	12.516

Fonte: Elaboração própria

Para avaliar a distribuição dos índices de dureza, em relação a localização espacial das propriedades e o grau de significância da dependência espacial dos dados, foram construídos os semivariogramas de cada superfície. Os gráficos podem ser visualizados na Figura 43, a seguir.

Figura 43 – Semivariogramas referentes as superfícies laterais





Fonte: Elaboração própria

A Tabela 21 exibe de forma resumida os parâmetros apresentados pelo semivariogramas da Figura 43.

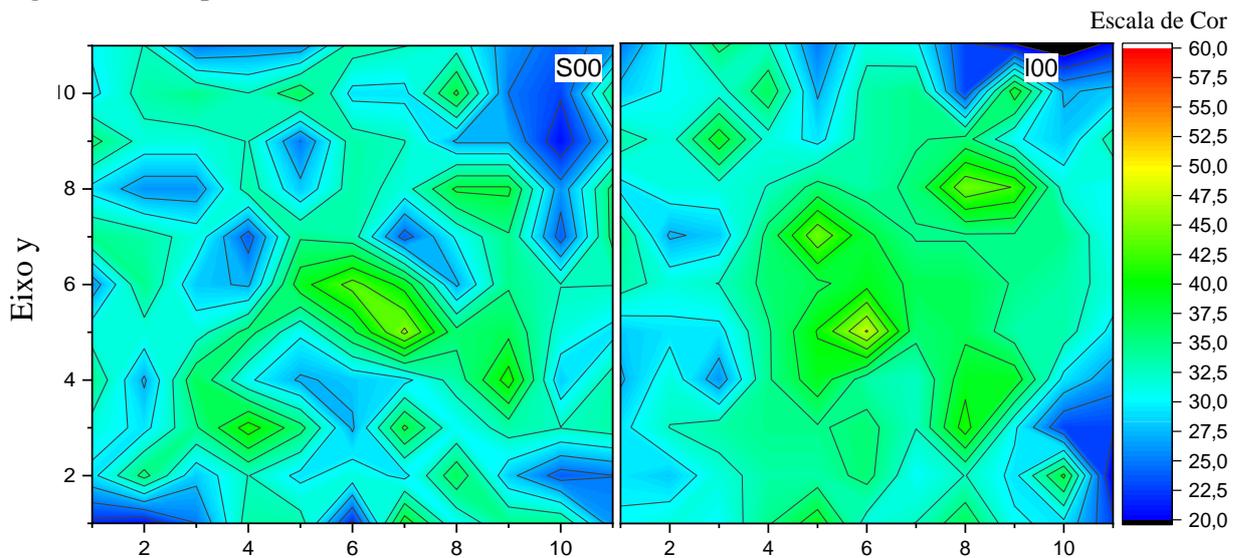
Tabela 21 – Resumo dos parâmetros dos semivariogramas das superfícies laterais

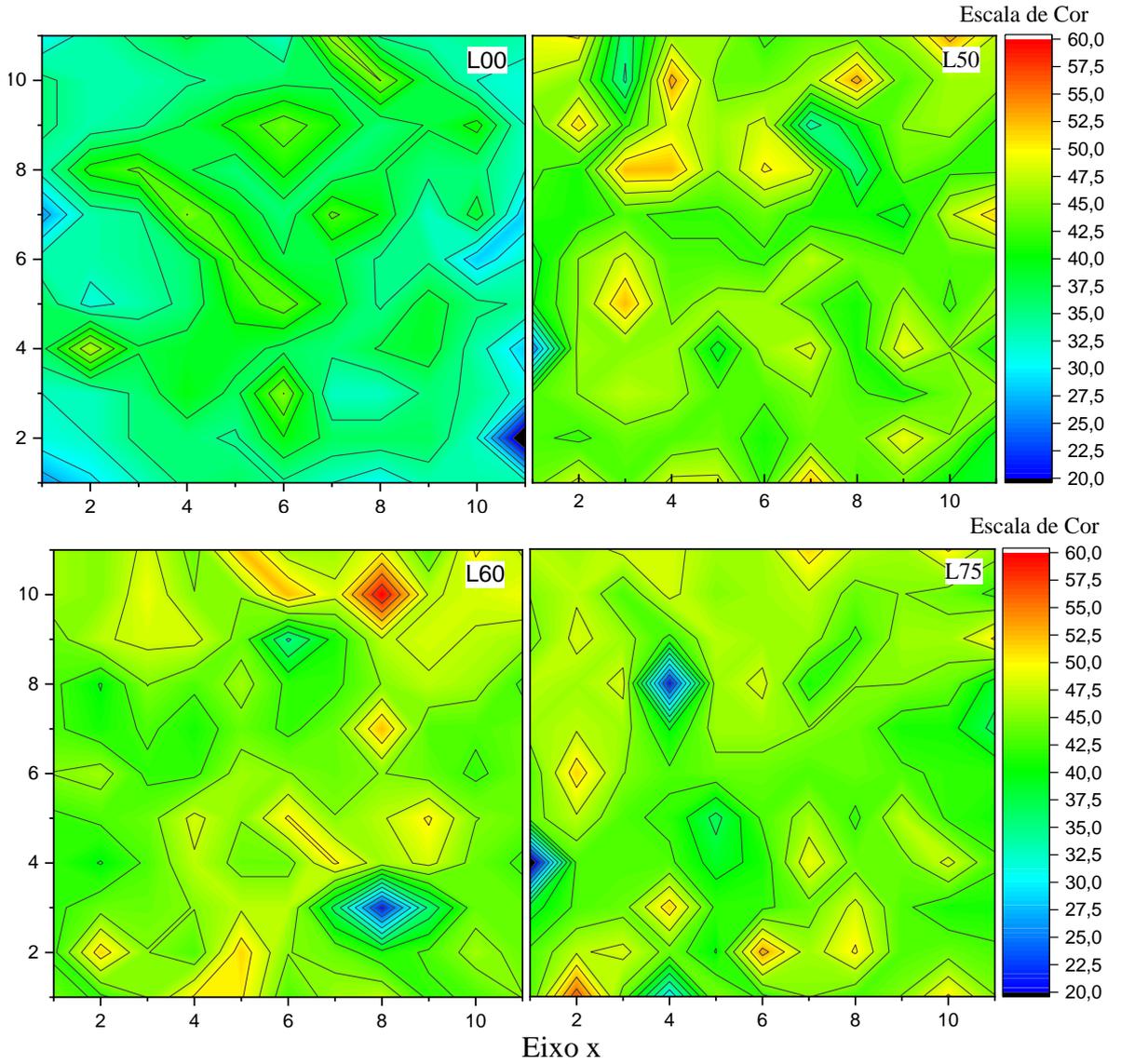
Face	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (cm)	Alcance Real (cm)
L00 ¹	6,63	11,74	1,63	4,88
L00 ²	14,3	24,2	0,70	2,097
L50 ¹	7,29	10,21	0,46	1,37
L50 ²	4,8	8,79	0,58	1,73
L60 ¹	5,92	12,91	0,7	2,097
L60 ²	5,18	12,94	0,7	2,097
L75 ¹	7,68	18,16	1,28	3,83
L75 ²	6,94	8,32	0,58	1,73

Fonte: Elaboração própria

Os mapas de contorno das faces analisadas também foram gerados, e são exibidos na Figura 44 e Figura 45, que possibilitam a visualização da mudança de comportamento das superfícies, conforme o carregamento é simultaneamente aplicado durante leitura dos índices de dureza, além de permitir uma melhor percepção do comportamento dos dados ao longo das superfícies de concreto, em conformidade com a distribuição de frequência apresentada nos histogramas da Figura 36, Figura 39 e Figura 42.

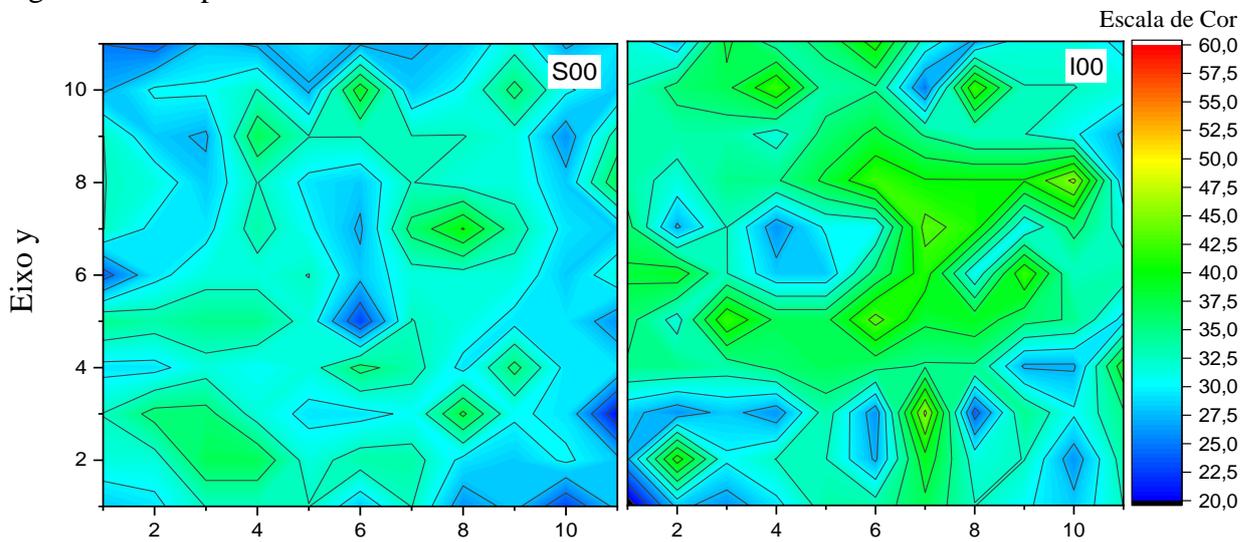
Figura 44 – Mapa de contorno da amostra 01

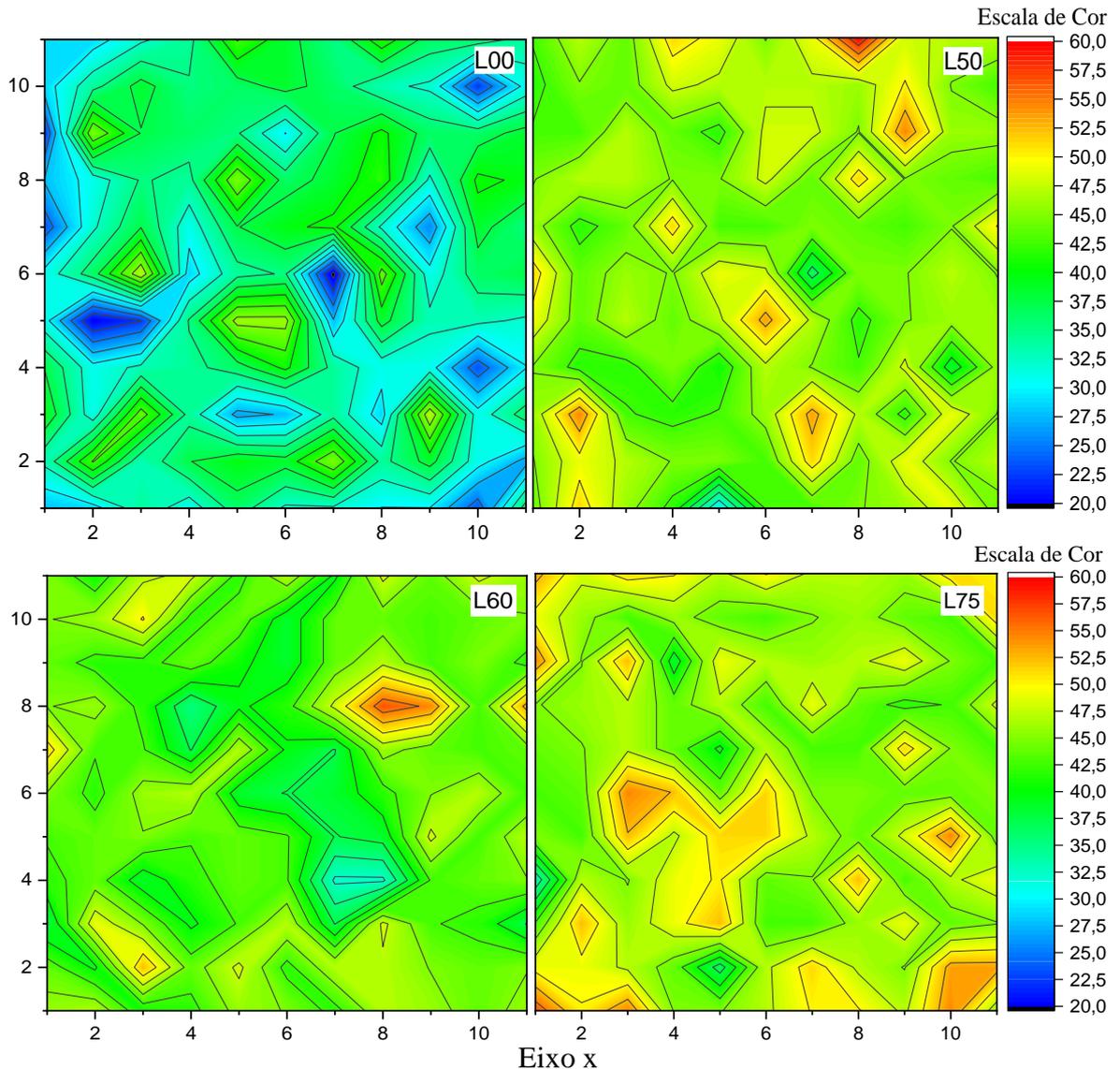




Fonte: Elaboração própria

Figura 45 – Mapa de contorno da amostra 02





Fonte: Elaboração própria

Segundo o que pode se observar nos mapas de contorno das faces estudadas, é possível concluir que para I00 e S00, o comportamento é visualmente muito semelhante ao longo da superfície de ambos os cubos. Quanto a face L00, no caso do cubo C1, o comportamento é mais uniforme, com uma média de dureza superficial superior em relação as demais faces sem carregamento. Em relação ao cubo C2, essa face apresentou ao longo de sua superfície picos bem definidos de baixa e alta dureza.

No que tange as faces analisadas sob a influência de carregamento, a Figura 44 e Figura 45, permitem observar a mudança expressiva na tonalidade da escala de cor que as faces L50, L60 e L75 de ambos os cubos apresentam quando comparadas as faces I00, S00 e L00. Além disso, é possível perceber através da análise dos mapas, a menor quantidade de linhas de contorno que formam a representação dessas superfícies, o que caracterizou superfícies com

regiões muito bem definidas, predominando principalmente regiões de média dureza superficial, com grande número de picos de alta dureza superficial, enquanto as regiões de baixa dureza somaram uma área total pouco expressiva.

Destaca-se ainda, que apesar das leituras de índices esclerométricos terem sido realizadas a 2 cm das bordas das faces, continuou-se observando uma concentração de valores mínimos nas regiões mais próximas das bordas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta um estudo sobre parâmetros estatísticos espaciais e não espaciais, acerca das propriedades mecânicas de resistência à compressão axial e dureza superficial, de um material heterogêneo de comportamento frágil, o concreto C50, que teve seu traço avaliado com diferentes dimensões máximas características de agregado graúdo, afim de definir se, e como, esse componente pode influenciar nos parâmetros estatísticos do material e no comportamento da distribuição das propriedades do concreto. Além disso, os parâmetros estatísticos e a distribuição espacial das propriedades foram avaliados sob tensão de compressão, com o objetivo de estimar se o estado de tensões que um corpo é submetido pode influenciar nos resultados encontrados.

Os resultados experimentais aqui encontrados têm como finalidade calibrar alguns parâmetros estatísticos que são importantes no estudo da simulação de dano e fratura em materiais heterogêneos de comportamento frágil, nesse caso, o concreto. Uma vez que o conjunto de propriedades mecânicas regem o desempenho do material como um todo, caracterizar as mais diversas características e propriedades do material, de modo experimental, é fundamental para conseguir representar numericamente esses elementos, e conseguir definir um modelo matemático mais realístico possível.

As principais conclusões obtidas, são descritas a seguir:

- A resistência à compressão do concreto C50 não foi influenciada pela dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado.
- A superfície superior das amostras de concreto, sem condição de confinamento, mostrou-se mais resistente que a face inferior, na maioria dos casos analisados. Isto se deve ao fato que face inferior apresentar uma maior quantidade de defeitos, vazios provocados por ar aprisionado e água abaixo dos agregados em relação a superfície superior.
- Em ambas as superfícies de concreto, nas regiões de bordas e arestas, se observa uma grande diminuição do IE. Como sugerido pela norma NBR 7584 (ABNT, 2012), o ideal é não realizar leituras nessas regiões e suas proximidades.
- A resistência lateral dos cubos mostrou ser 10% superior que a resistência na direção vertical (superior-inferior).
- Os valores de IEs aumentam de acordo com a situação de carregamento a qual a estrutura está submetida. Um aumento de 20% é esperado quando as tensões de compressão estão na ordem de 50%, ou mais, da tensão de ruptura do material.
- A forma da distribuição e os parâmetros do semivariograma, que representam a

distribuição espacial dos IEs, não variam significativamente com relação a direção na qual os dados são obtidos ou ao carregamento ao qual o material está submetido.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, Zameer S.; KHALID, Ahmad F.; ZAIGHAM, Hamid. Indentation fracture toughness behavior of FeCo-based bulk metallic glass intrinsic composites. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 457, p. 86-92, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.11.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309316305117>. Acesso em: 28 abril 2020.
- AGUIAR, Adair R.; FOSDICK, Roger. A constitutive model for a linearly elastic peridynamic body. **Mathematics and Mechanics of Solids**, v. 19, n. 5, p. 502-523, 2014. <https://doi.org/10.1177/1081286512472092>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1081286512472092>. Acesso em: 19 junho 2020.
- ANDERSON, Ted. L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. 3rd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2005. 621 p. ISBN 0849316561.
- ANDRIOTTI, José L. Silva. Introdução à geoestatística. **Acta Geologica Leopoldensia**, v. 11, n. 27, p. 7-82, 1988. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/14835/1/Art_introd_geoestat_Andriotti.pdf. Acesso em: 20 agosto 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ___: **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ___: **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- ___: **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ___: **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ___: **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ___: **NBR 7584**: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
- ___: **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- CABRAL, Néstor R. et al. An alternative bilinear peridynamic model to simulate the damage process in quasi-brittle materials. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 216, p. 106494, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106494>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379441930147X>. Acesso em: 19 junho 2020.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. xx, p. 705. ISBN 8521615958.

CAMARGO, Eduardo. C. G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geostatísticos (krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (Spring)**. Tese (Mestrado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos/Brasil, 1997.

CLARK, Isobel. **Practical geostatistics**. London: Applied Science Publishers, 1979.

CONSTANTINIDES, Georgios; ULM, Franz-Josef.; VAN VLIET, Krystyn. On the use of nanoindentation for cementitious materials. **Materials and structures**, v. 36, n. 3, p. 191-196, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF02479557>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02479557>. Acesso em: 11 maio 2020.

CONSTANTINIDES, Georgios et al. Grid indentation analysis of composite microstructure and mechanics: Principles and validation. **Materials Science and Engineering: A**, v. 430, n. 1-2, p. 189-202, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.125>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509306009294>. Acesso em: 11 maio 2020.

CONSTANTINIDES, Georgios; ULM, Franz-Josef. The nanogranular nature of C–S–H. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 55, n. 1, p. 64-90, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.06.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022509606001062>. Acesso em: 11 maio 2020.

ĆORIĆ, Danko; RENJO, Marijana Majić; ĆURKOVIĆ, Lidija. Vickers indentation fracture toughness of Y-TZP dental ceramics. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 64, p. 14-19, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.12.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026343681630556X>. Acesso em: 28 abril 2020.

DALGUER, L. A.; IRIKURA, K.; RIERA, J. D. Generation of new cracks accompanied by

DA SILVA, Guilherme S.; KOSTESKI, Luis E.; ITURRIOZ, Ignacio. Analysis of the failure process by using the Lattice Discrete Element Method in the Abaqus environment. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, p. 102563, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102563>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844220301385>. Acesso em: 01 julho 2020.

EVANGELISTA, Ana C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

FISCHER-CRIPS, Anthony. C. **Nanoindentation**. 3th ed. New York: Springer-Verlag, 2011. p. 279. ISBN 978-1-4419-9872-9

FRIEDRICH, Leandro; DA SILVA, Mylena B.; ITURRIOZ, Ignacio. Random field generation of the material properties in a peridynamic model. **In: 25th International Congress of Mechanical Engineering**, 2019. Proceedings of the 25th International Congress of Mechanical Engineering. doi://10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-0482. Disponível em: <http://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/22419>. Acesso em: 02 abril 2020.

HORNYAK, Gabor L. et al. **Fundamentals of nanotechnology**. Boca Raton: CRC press, 2009. p. 799.

ISAAKS, Edward. H.; SRIVASTAVA, R Rajendra. M. **Applied geostatistics**. Oxford: Oxford University Press, 1989. p. 558. ISBN 978-0-19-605013-4.

ITURRIOZ, Ignacio. **Aplicação de Método dos Elementos Discretos ao estudo de estruturas laminares de concreto armado**. Tese (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS/Brasil, 1995.

ITURRIOZ, Ignacio; MIGUEL, Letícia F. F.; RIERA, Jorge D. Dynamic fracture analysis of concrete or rock plates by means of the Discrete Element Method. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 6, n. 3, p. 229-245, 2009. Disponível em: <https://www.lajss.org/index.php/LAJSS/article/view/223>. Acesso em: 21 novembro 2019.

ITURRIOZ, Ignacio; LACIDOGNA, Giuseppe; CARPINTERI, Alberto. Experimental analysis and truss-like discrete element model simulation of concrete specimens under uniaxial compression. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 110, p. 81-98, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.07.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794413002567>. Acesso em: 17 junho 2020.

JUNGES, Bruna M. B. et al. Hardness correlation length in a self-compacting concrete. **IBRACON Struct. Mater. J.**, vol. 13, no. 4, e13401, 2020. No prelo. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000400001>.

KOSTESKI, Luis E. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos Formados por Barras no Estudo do Colapso de Estruturas**. Tese (Doutorado), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS/Brasil, 2012.

KOSTESKI, Luis E.; D'AMBRA, Ricardo B.; ITURRIOZ, Ignacio. Crack propagation in elastic solids using the truss-like discrete element method. **International journal of fracture**, v. 174, n. 2, p. 139-161, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10704-012-9684-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10704-012-9684-4>. Acesso em: 19 fevereiro 2020.

KOSTESKI, Luis E. et al. Analysis of reinforced concrete plates subjected to impact employing the truss-like discrete element method. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 38, n. 3, p. 276-289, 2014. <https://doi.org/10.1111/ffe.12227>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ffe.12227>. Acesso em: 17 junho 2020.

KOSTESKI, Luis E. et al. A lattice discrete element method to model the falling-weight impact test of PMMA specimens. **International Journal of Impact Engineering**, v. 87, p. 120-131, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.06.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X1500127X>. Acesso em: 17 junho 2020.

KOSTESKI, Luis E. et al. Size Effect in Heterogeneous Materials analyzed through a Lattice Discrete Element Method Approach. **Engineering Fracture Mechanics**, p. 107041, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107041>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794420303921>. Acesso em 01 julho 2020.

KRIGE, Daniel G. **A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand**. Tese de Doutorado. University of the Witwatersrand. Johannesburg /South Africa, 1951.

LIU, Kouqi; OSTADHASSAN, Mehdi; BUBACH, Bailey. Applications of nano-indentation methods to estimate nanoscale mechanical properties of shale reservoir rocks. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 35, p. 1310-1319, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.09.068>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510016307089>. Acesso em: 28 abril 2020.

MALZBENDER, Jürgen. et al. Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano-particle-filled sol-gel coatings on glass. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 36, n. 2-3, p. 47-103, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(01\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(01)00040-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X01000407>. Acesso em: 08 abril 2020.

MARIMUTHU, Karuppasamy P. et al. Spherical indentation for brittle fracture toughness evaluation by considering kinked-cone-crack. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 37, n. 1, p. 381-391, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.08.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221916304484>. Acesso em: 28 abril 2020.

MATHERON, Georges. Principles of geostatistics. **Economic geology**, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/economicgeology/article-pdf/58/8/1246/3481854/1246.pdf>. Acesso em: 11 setembro 2019.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006

MIYAZAKI, Hiroyuki; YOSHIZAWA, Yu-ichi. A reinvestigation of the validity of the indentation fracture (IF) method as applied to ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 37, n. 15, p. 4437-4441, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.07.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221917305137>. Acesso em: 28 abril 2020.

MORADKHANI, Alireza; BAHARVANDI, Hamidreza. Determining the fracture resistance of B4C-NanoSiB6 nanocomposite by Vickers indentation method and exploring its mechanical properties. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 68, p. 159-165, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.07.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436817301968>. Acesso em: 28 abril 2020.

PALÁCIOS, M. P. G. **Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, 2012.

PELISSER, Fernando; GLEIZE, Philippe Jean Paul; MIKOWSKI, Alexandre. Propriedades nanomecânicas do silicato de cálcio hidratado de síntese. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 129-139, 2009. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/9438/7072>. Acesso em 21 abril 2020.

PUGLIA, Vicente B. et al. Random field generation of the material properties in the truss-like discrete element method. **Mecânica Computacional, Cilance-Mecom**, v. 29, p. 6793-6807, 2010. Disponível em: <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/issue/view/582>. Acesso em: 23 novembro 2019.

PUGLIA, Vicente. B. **Estudo da Ruptura em Materiais Heterogêneos Quase Frágeis Aplicando o Método dos Elementos Discretos Formado por Barras Juntamente com a Técnica de Emissão Acústica.** Tese (Doutorado), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS/Brasil, 2014.

PUGLIA, Vicente B.; ITURRIOZ, Ignacio; MIGUEL, Letícia F. F. Caracterização do processo de fratura utilizando o método dos elementos discretos e as técnicas de emissão acústica. **Revista sul-americana de engenharia estrutural**. Passo Fundo, RS. Vol. 12, n. 1 (jan./abr. 2015), p. 29-53, 2015. <http://dx.doi.org/105335/rsee.v12i1/4026>. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/rsae/article/view/4026/3838>. Acesso em: 01 julho 2020.

PUGLIA, Vicente B. et al. Random field generation of the material properties in the lattice discrete element method. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 54, n. 4, p. 236-246, 2019. <https://doi.org/10.1177/0309324719858849>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0309324719858849>. Acesso em: 07 fevereiro 2020.

RÄDEL, Martin et al. Peridynamics: Convergence & influence of probabilistic material distribution on crack initiation. **6th ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites: COMPOSITES 2017**, p. 1-26, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Christian_Willberg/publication/320014912_Peridynamics_Convergence_Influence_of_Probabilistic_Material_Distribution_on_Crack_Initiation/links/59c8a9ac458515548f3aad68/Peridynamics-Convergence-Influence-of-Probabilistic-Material-Distribution-on-Crack-Initiation.pdf. Acesso em: 07 fevereiro 2020.

RICKHEY, Felix et al. Evaluation of the fracture toughness of brittle hardening materials by Vickers indentation. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 148, p. 134-144, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.09.028>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794415005445>. Acesso em: 08 abril 2020.

ROCHA, Marcelo. M. **Ruptura e Efeitos de Escala em Materiais não Homogêneos**. Tese (Mestrado), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS/Brasil, 1989.

SAMPAIO, Célia M. C. P. **Caracterização do betão através de técnicas não-destrutivas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização Materiais e Processos de Construção) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2010.

TEIXEIRA, Marcilia B. R. **Comparação entre estimadores de semivariância**. Tese (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras/Brasil, 2013.

TEIXEIRA, Marcilia B. R.; SCALON, Joao D. COMPARACÃO ENTRE ESTIMADORES DE SEMIVARIÂNCIA. **Rev. Bras. Biom**, v. 31, n. 2, p. 248-269, 2013. Disponível em: http://jaguar.fcav.unesp.br/RME/fasciculos/v31/v31_n2/A6_Marcilia_Scalon.pdf. Acesso em: 21 agosto 2019.

VIEIRA, S. R. J. L. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983. DOI:10.3733/hilg.v51n03p075. Disponível em: <http://hilgardia.ucanr.edu/fileaccess.cfm?article=152848&p=NSZLCD>. Acesso em: 11 setembro 2020

WOJCIECHOWSKI, Julio C. et al. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 4, p. 383-391, 2009. <https://doi.org/10.5902/19805098894>. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cflo/v19n4/1980-5098-cflo-19-04-00383.pdf>. Acesso em: 13 maio 2019.

ZHAO, Jiangming et al. A stochastic multiscale peridynamic model for corrosion-induced fracture in reinforced concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, p. 106969, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106969>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794420300199>. Acesso em: 01 julho 2020.

APÊNDICE A – Dados de Índices Esclerométricos

Figura 46 - Índices Esclerométricos (a) Cubo 01 e (b) Cubo 02

(a)

S00-1											I00-1										
30,52	29,43	29,43	27,25	28,34	33,79	34,88	29,43	33,79	28,34	25,07	21,80	29,43	31,61	34,88	31,61	26,16	34,88	29,43	35,97	29,43	30,52
31,61	28,34	32,7	31,61	29,43	31,61	27,25	31,61	31,61	30,52	30,52	20,71	35,97	29,43	27,25	31,61	34,88	33,79	26,16	31,61	33,79	32,70
30,52	31,61	33,79	26,16	29,43	32,7	28,34	31,61	39,24	31,61	35,97	25,07	28,34	34,88	37,06	31,61	28,34	31,61	26,16	31,61	34,88	25,07
34,88	33,79	34,88	34,88	34,88	35,97	35,97	32,7	31,61	37,06	32,7	33,79	32,70	41,42	30,52	35,97	27,25	23,98	33,79	32,70	32,70	26,16
39,24	33,79	34,88	39,24	40,33	37,06	44,69	35,97	29,43	27,25	25,07	33,79	29,43	35,97	27,25	30,52	39,24	34,88	28,34	25,07	37,06	26,16
31,61	35,97	35,97	33,79	47,96	39,24	38,15	33,79	33,79	33,79	31,61	21,80	31,61	27,25	28,34	37,06	43,60	33,79	33,79	33,79	29,43	33,79
32,7	30,52	32,70	32,7	35,97	37,06	34,88	35,97	34,88	34,88	30,52	39,24	29,43	38,15	29,43	45,78	39,24	23,98	31,61	32,70	29,43	32,70
37,06	32,7	41,42	39,24	37,06	37,06	34,88	44,69	35,97	22,89	22,89	30,52	37,06	30,52	33,79	35,97	27,25	30,52	38,15	27,25	38,15	31,61
30,52	29,43	30,52	39,24	33,79	34,88	34,88	42,51	30,52	39,24	19,62	34,88	28,34	33,79	41,42	37,06	34,88	34,88	38,15	27,25	25,07	26,16
29,43	38,15	22,89	29,43	33,79	33,79	34,88	31,61	28,34	27,25	17,44	34,88	23,98	32,70	28,34	31,61	32,70	23,98	26,16	20,71	22,89	23,98
22,89	19,62	22,89	26,16	29,43	31,61	30,52	30,52	33,79	28,34	20,71	26,16	25,07	33,79	33,79	29,43	32,70	35,97	35,97	28,34	34,88	26,16

L00-1											L50-1										
26,21	31,45	32,50	36,70	36,70	33,55	26,21	33,55	35,65	35,65	30,41	44,04	42,99	42,99		39,84	38,79	41,94	42,99	42,99	47,18	49,28
29,36	32,50	32,50	47,18	31,45	33,55	33,55	40,89	33,55	33,55	33,55	48,23	41,94	45,09	46,13	45,09	45,09	40,89	40,89	51,38	45,09	50,33
32,50	35,65	35,65	37,75	33,55	34,60	34,60	42,99	34,60	33,55	35,65	42,99	44,04	47,18	45,09	52,42	48,23	42,99	52,42	41,94	34,60	35,65
35,65	35,65	39,84	38,79	35,65	35,65	45,09	37,75	37,75	34,60	37,75	48,23	42,99	46,13	46,13	44,04	42,99	41,94	52,42	48,23	53,47	46,13
36,70	34,60	36,70	38,79	40,89	42,99	39,84	35,65	40,89	35,65	35,65	48,23	44,04	42,99	38,79	46,13	42,99	41,94	45,09	46,13	44,04	46,13
34,60	39,84	45,09	36,70	44,04	37,75	35,65	40,89	44,04	36,70	32,50	41,94	40,89	42,99	46,13	46,13	41,94	44,04	50,33	48,23	44,04	41,94
32,50	36,70	32,50	35,65	38,79	37,75	42,99	35,65	40,89	36,70	46,13	52,42	44,04	45,09	48,23	42,99	47,18	40,89	48,23	33,55	46,13	44,04
30,41	36,70	32,50	37,75	34,60	34,60	39,84	37,75	35,65	45,09	34,60	42,99	44,04	42,99	40,89	40,89	44,04	40,89	35,65		53,47	44,04
33,55	36,70	35,65	38,79	38,79	34,60	32,50	35,65	37,75	37,75	33,55	44,04	49,28	40,89	49,28	46,13	42,99	38,79	44,04	45,09	42,99	46,13
33,55	32,50	34,60	33,55	35,65	28,31	38,79	35,65	40,89	32,50	34,60	39,84	45,09	44,04	45,09	41,94	42,99	47,18	41,94	46,13	46,13	53,47
33,55		31,45	28,31	34,60	32,50	28,31	32,50	32,50	31,45	33,55	38,79	38,79	46,13	40,89	46,13	42,99	51,38	41,94	41,94	46,13	47,18

L60-1											L75-1										
44,04	41,94	41,94	41,94	41,94	45,09	42,99	42,99	44,04	46,13	46,13	42,99	42,99	38,79		44,04	42,99	46,13	47,18	44,04	45,09	47,18
41,94	51,38	44,04	39,84	42,99	46,13	40,89	39,84	47,18	45,09	45,09	56,62	47,18	42,99	42,99	47,18	51,38	47,18	46,13	48,23	47,18	46,13
45,09	45,09	44,04	42,99	44,04	41,94	42,99	45,09	48,23	49,28	48,23	44,04	48,23	44,04	42,99	42,99	45,09	46,13	48,23	46,13	42,99	48,23
50,33	42,99	45,09	47,18	48,23	41,94	40,89	42,99	48,23	45,09	44,04	30,41	44,04	51,38	42,99	41,94	42,99	39,84		41,94	48,23	48,23
50,33	51,38	47,18	44,04	45,09	46,13	44,04	46,13	44,04	45,09	52,42	45,09	39,84	41,94	38,79	36,70	44,04	46,13	46,13	47,18	45,09	46,13
42,99	45,09	47,18	44,04	50,33	45,09	41,94	41,94	34,60	52,42	46,13	41,94	53,47	41,94	40,89	42,99	44,04	46,13	48,23	46,13	46,13	46,13
46,13	44,04	36,70	50,33	45,09	44,04	44,04	41,94	40,89	48,23	46,13	45,09	46,13	44,04	49,28	46,13	42,99	45,09	40,89	46,13	47,18	51,38
47,18	40,89		46,13	47,18	45,09	52,42	45,09	47,18		49,28	42,99	50,33	48,23	44,04	41,94	44,04	44,04	45,09	41,94	44,04	47,18
41,94	42,99	35,65	48,23	50,33	44,04	42,99	47,18	48,23	47,18	42,99	45,09	42,99	42,99	44,04	47,18	42,99	40,89	45,09	46,13	45,09	46,13
42,99	46,13	44,04	44,04	45,09	41,94	42,99	46,13	47,18	48,23	50,33	50,33	44,04	40,89	48,23	41,94	41,94	40,89	44,04	46,13	44,04	50,33
45,09	44,04	44,04	41,94	44,04	44,04	44,04	41,94	46,13	49,28	47,18	45,09	42,99	40,89	42,99	40,89	41,94	36,70	38,79	50,33	41,94	46,13

(b)

S00-2											I00-2										
	27,25	28,34	34,88	35,97	38,15	35,97	33,79	33,79	32,7	31,61	28,34	31,61	32,7	29,43	34,88	23,98	32,7	32,7	32,7	27,25	25,07
28,34	41,42	26,16	34,88	31,61	39,24	27,25	31,61	33,79	35,97	28,34	29,43	31,61	35,97	29,43	33,79	29,43	29,43	31,61	28,34	30,52	23,98
26,16	30,52	28,34	33,79	42,51	32,7	32,7	34,88	33,79	37,06	38,15	32,7	37,06	35,97	31,61	34,88	31,61	29,43	28,34	27,25	30,52	28,34
29,43	32,7	26,16	35,97	37,06	28,34	26,16	34,88	31,61	42,51	33,79	32,7	37,06	31,61	30,52	34,88	31,61	33,79	32,7	37,06	32,7	27,25
33,79	32,7	33,79	37,06	37,06	28,34	30,52	38,15	35,97	33,79	35,97	32,7	31,61	29,43	31,61	31,61	32,7	30,52	29,43	32,7	27,25	29,43
33,79	27,25	26,16	35,97	43,6	35,97	30,52	42,51	38,15	34,88	41,42	28,34	33,79	29,43	35,97	22,89	28,34	27,25	28,34	32,7	39,24	27,25
37,06	39,24	45,78	34,88	38,15	41,42	43,6	40,33	34,88	25,07	31,61	32,7	33,79	30,52	33,79	32,7	31,61	35,97	32,7	32,7	28,34	27,25
30,52	31,61	23,98	34,88	39,24	30,52	41,42	40,33	32,7	42,51	27,25	26,16	29,43	38,15	29,43	31,61	31,61	40,33	31,61	32,7	30,52	28,34
30,52	32,7	34,88	27,25	35,97	42,51	30,52	40,33	32,7	32,7	31,61	28,34	28,34	30,52	35,97	29,43	31,61	33,79	31,61	31,61	35,97	31,61
28,34	26,16	30,52	27,25	34,88	32,7	35,97	45,78	30,52	32,7	31,61	22,89	30,52	29,43	29,43	29,43	28,34	29,43	28,34	26,16	30,52	27,25
32,7	33,79	34,88	39,24	29,43	33,79	31,61	28,34	27,25	31,61	29,43	28,34	28,34	20,71	29,43	26,16	31,61	28,34	37,06	33,79	28,34	29,43

L00-2											L50-2										
27,82	33,17	39,59	37,45	31,03	31,03	23,54	27,82	22,47	28,89	28,89	43,87	44,94	46,01	44,94	49,22	51,36	46,01	44,94	42,8	41,73	42,8
28,89	42,8	31,03	31,03		36,38	32,1	31,03	44,94	34,24	28,89	51,36	49,22	54,57	41,73	43,87	43,87	41,73	47,08	42,8	44,94	47,08
34,24	33,17	43,87	33,17	22,47	47,08	37,45	35,31	37,45	38,52	32,1	46,01	47,08	42,8	41,73	47,08	46,01	43,87	47,08	47,08	43,87	43,87
31,03	37,45	34,24	34,24	35,31	28,89	31,03	34,24	36,38	35,31	34,24	41,73	44,94	41,73	44,94	43,87	44,94	51,36	44,94	43,87	48,15	51,36
36,38	39,59	26,75	36,38	46,01	34,24	37,45	44,94	35,31	36,38	42,8		44,94	42,8	40,66	47,08	49,22	42,8	44,94	41,73	47,08	49,22
32,1	38,52	27,82	40,66	46,01	35,31	39,59	36,38	29,96	38,52	38,52	42,8	42,8	46,01	47,08	53,5	48,15	42,8	48,15	48,15	47,08	44,94
32,1	44,94	34,24	34,24	27,82	19,26	40,66	38,52	37,45	36,38	35,31	44,94	51,36	53,5	44,94	47,08	36,38	44,94	43,87	48,15	47,08	49,22
29,96	34,24	28,89	31,03	38,52	43,87	32,1	41,73	40,66	33,17	41,73	44,94	43,87	47,08	42,8	41,73	44,94	43,87	51,36	44,94	46,01	
29,96	38,52	47,08	31,03	33,17	31,03	25,68	32,1	36,38	32,1	36,38	46,01	49,22	41,73	48,15	44,94	44,94	42,8	44,94	54,57	50,29	48,15
23,54	31,03	31,03	23,54	33,17	36,38	38,52	40,66	36,38	22,47	36,38	49,22	44,94	49,22	38,52	46,01	47,08	44,94	43,87	46,01	44,94	47,08
36,38	26,75	36,38	29,96	32,1	37,45	35,31	39,59	38,52	31,03	34,24	43,87	47,08	44,94	46,01	46,01	44,94	50,29	42,8	46,01	42,8	47,08

L60-2											L75-2										
46,01	43,87	37,45	41,73	42,8	44,94	51,36	44,94	43,87	44,94	44,94	56,71	49,22	42,8		44,94	42,8	43,87	44,94	54,57	49,22	53,5
47,08	39,59	49,22	43,87	43,87	41,73	42,8	46,01	41,73	46,01	40,66	50,29	49,22	52,43	47,08	42,8	43,87	44,94	46,01	44,94	46,01	48,15
40,66	52,43	44,94	38,52	44,94	46,01	42,8	41,73	41,73	50,29	47,08	54,57	47,08	46,01	44,94	52,43	54,57	47,08	47,08	52,43	42,8	51,36
41,73	43,87	39,59	41,73	42,8	47,08	37,45	35,31	43,87	41,73	48,15	44,94	43,87	49,22	49,22	47,08	52,43	43,87	43,87	38,52	46,01	50,29
46,01	48,15	42,8	43,87	43,87	38,52	47,08	39,59	40,66	43,87	41,73	44,94	36,38	52,43	50,29	51,36	43,87	39,59	47,08	49,22	43,87	47,08
44,94	41,73	47,08	42,8	42,8	37,45	39,59	41,73	38,52	38,52	47,08	47,08	47,08	42,8	43,87	51,36	51,36	47,08	42,8	47,08	42,8	50,29
41,73	47,08	37,45		37,45	38,52	37,45	48,15	43,87	43,87	39,59	50,29	51,36	42,8	44,94	47,08	44,94	42,8	49,22	46,01	44,94	47,08
47,08	47,08	48,15		38,52	41,73	46,01	56,71	47,08	43,87	48,15	50,29	47,08	46,01	52,43	43,87	44,94	42,8	43,87	47,08	46,01	47,08
46,01	44,94	42,8	42,8	48,15	44,94	43,87	54,57	42,8	42,8	43,87	47,08	44,94	49,22	42,8	48,15	43,87	51,36	41,73	49,22	43,87	46,01
43,87	43,87	41,73	43,87	42,8	47,08	42,8	42,8	44,94	43,87	48,15	54,57	53,5	43,87	47,08	54,57	43,87	44,94	42,8	44,94	42,8	51,36
46,01	44,94	37,45	44,94	47,08	42,8	43,87	53,5	41,73	44,94	46,01	46,01	53,5	44,94	49,22	43,87	44,94	42,8	48,15	42,8	51,36	50,29

Fonte: Elaboração própria

Figura 47 - IE BRITA 01 (a) B1FS¹; (b) B1FI¹; (c) B1FS² e (d) B1FI²

(a)

B1FS ¹																																					
20	22	24	27	29	23	36	28	30	33	33	28	32	31	28	31	36	31	27	24	28	33	31	26	27	26	30	22	30	29	31	26	32	24	23	28	26	22
24	28	32	33	26	24	32	30	32	27	31	26	32	27	30	31	32	32	27	31	26	26	34	26	31	30	36	33	30	30	27	31	28	24	29	26	24	24
27	24	33	30	26	26	36	37	32	28	28	38	29	31	32	37	34	29	29	36	35	27	29	27	32	29	35	28	24	31	29	29	24	27	26	28	24	24
22	28	27	31	28	34	27	29	38	35	37	35	33	37	34	35	30	37	28	26	38	23	28	29	30	29	39	27	27	28	30	36	32	28	29	26	31	24
26	28	27	29	27	30	24	35	27	27	39	37	29	35	35	37	31	33	27	33	26	26	28	28	34	30	30	34	28	26	31	27	31	23	24	24	22	23
28	26	26	29	26	31	26	34	28	28	27	29	24	36	29	31	31	40	43	24	27	26	31	36	29	28	31	24	38	26	29	31	24	24	24	24	29	26
24	26	28	29	27	35	34	39	36	30	27	29	27	29	27	30	39	43	41	28	32	27	26	29	32	27	28	28	29	22	27	30	31	28	27	26	32	23
28	27	29	29	33	35	29	37	29	29	34	30	27	29	30	31	37	37	29	33	30	30	29	30	29	30	28	32	29	26	28	29	26	27	33	24	28	26
29	28	28	30	29	33	27	28	32	39	31	37	36	40	30	36	26	33	29	34	30	27	30	30	29	29	32	30	32	30	27	28	34	26	27	30	30	23
29	28	29	34	27	36	29	31	30	41	35	38	24	29	29	37	31	28		39	30	29	30	35	40	30	36	30	35	29	27	33	28	31	27	32	29	27
21	38	30	42	33	28	33	33	37	29	36	29	30	34	30	39	31	29	39	29	28	31	30	36	32	34	32	30	31	37	28	32	28	28	26	27	31	26
32	37	40	35	35	34	27	31	39	31	36	41	27	30	29	30	37	33	31	30	29	27	30	30	34	43	32	35	39	32	33	31	28	35	27	33	27	26
29	31	32	29	33	30	37	30	30	38	41	30	30	40	31	30	29	31	29	32	41	32	33	20	32	30	28	33	29	32	39	31	33	34	27	34	29	27
33	31	37	30	34	34	35	30	35	33	37	31	30	30	33	29	30	30	30	37	30	30	34	35	32	28	30	27	28	35	29	34	32	36	28	32	29	26
29	29	29	30	30	26	34	31	36	35	32	30	32	36	33	29	31	30	34	29	29	30	40	37	31	35	30	29	30	40	33	31	31	27	27	28	35	34
39	29	33	30	31	24	31	30	31	30	30	41	28	35	33	33	31	38	36	38	30	27	30	33	40	28	33	30	31	35	30	32	32	30	29	34	28	28
37	40	31	35	29	30	32	39	36	33	31	35	29	30	29	33	34	29	30	28	30	30	28	33	34	30	31	35	32	34	33	30	29	35	30	32	28	30
40	37	32	33	31	37	32	30	31	31	34	30	31	36	31	31	38	30	28	30	29	31	30	30	30	32	36	27	33	29	29	28	34	28	28	28	28	28
31	38	31	34	31	36	28	31	31	37	33	33	30	26	31	31	37	31	39	31	28	30	32	31	32	29	31	31	39	29	42	32	24	31	32	26	28	28
37	30	31	30	31	32	28	31	31	31	35	33	32	30	29	32	30	29	28	33	30	30	31	30	27	29	26	32	33	31	31	37	29	30	27	28	28	35
33	32	31	32	33	39	37	31	34	33	32	33	32	31	28	31	37	30	29	29	30	29	30	27	32	28	30	30	37	30	30	28	27	40	28	30	28	28
34	35	42	24	36	31	33	31	27	31	41	27	29	36	32	36	30	27	34	22	30	29	30	24	33	36	33	30	32	28	33	30	30	35	29	29	26	28
36	36	30	31	27	35	31	31	34	29	41	31	37	30	30	31	28	30	28	29	40	31	28	30	29	37	26	31	35	28	29	27	30	40	30	28	33	34
20	33	32	29	31	35	31	30	23	30	28	31	29	30	30	42	27	29	32	30	28	31	29	28	30	31	33	34	26	28	37	35	28	28	28	30	34	26
31	31	29	30	31	31	38	31	30	27	38	30	29	30	30	31	29	23	28	29	30	29	30	32	30	28	33	32	32	34	31	31	41	34	29	30	30	28
42	28	30	39	33	35	32	36	37	41	31	30	30	29	31	24	29	27	28	29	26	28	38	32	30	30	31	30	32	30	30	28	27	35	30	26	27	26
36	30	39	30	29	34	30	29	37	33	26	29	21	29	27	28	30	30	29	31	30	34	30	33	30	28	31	34	29	26	32	31	29	29	27	30	27	23
24	29	24	30	31	42	29	29	29	37	29	31	33	30	29	31	29	34	40	31	31	30	40	31	30	35	30	35	30	32	32	32	35	28	29	28	27	27
28	30	26	27	29	28	34	38	31	28	29	31	26	31	28	35	32	30	43	36	33	29	32	35	32	30	30	27	29	38	32	32	23	32	28	39	30	26
32	35	35	29	28	28	30	37	31	26	31	30	26	33	30	30	27	31	41	26	31	29	22	29	33	32	29	30	29	30	33	33	28	28	26	29	26	21
27	28	28	36	28	28	35	30	38	35	29	27	32	39	31	32	38	26	37	29	24	30	30	34	27	35	38	31	30	27	30	33	30	27	30	26	26	
26	24	31	28	26	29	30	33	33	28	26	23	31	39	29	31	35	33	36	26	41	35	34	31	30	35	30	35	35	29	35	38	30	26	26	27	24	28
26	35	27	27	27	31	28	35	28	29	27	29	36	30	26	29	28	28	29	31	42	20	32	29	27	29	28	28	39	28	27	28	31	24	28	29	27	27
20	30	29	23	26	26	29	27	30	34	27	29	36	34	34	33	28	29	31	29	29	30	34	29	34	28	22	30	36	26	30	26	27	24	24	30	23	31
26	27	29	26	26	27	26	29	30	31	28	23	27	40	30	32	35	30	28	30	27	34	24	30	23	28	32	27	28	30	28	27	30	24	28	26	26	26
30	20	26	27	24	28	26	22	31	27	24	27	28	26	35	39	28	38	33	31	30	27	29	30	28	27	29	29	28	30	26	21	24	24	24	26	26	26
26	24	20	26	29	32	30	24	30	28	23	28	26	29	26	29	33	31	29	29	26	30	28	30	24	31	30	30	28	27	30	32	22	30	31	30	31	27
28	27	29	24	27	26	26	26	33	26	31	27	29	27	27	24	28	39	28	28	22	29	34	30	28	30	29	26	29	27	27	29	27	28	28	26	24	24

(b)

		BIFI																																			
		28	29	23	27	29	31	32	24	38	28	42	31	46	28	28	29	38	35	38	34	33	36	41	32	36	36	32	34	38	32	30	35	30	28	23	24
	29	34	29	33	34	33	31	33	32	30	31	35	34	35	33	42	41	42	36	35	33	38	33	40	37	37	40	34	36	37	33	34	30	38	30	24	26
28	31	30	32	30	34	32	36	31	26	34	36	35	33	43	38	37	37	35	40	40	29	35	34	34	34	35	37	34	34	33	34	34	30	30	29	33	21
23	28	34	29	32	35	35	35	34	31	33	34	35	34	33	35	36	38	35	40	39	33	31	28	35	38	35	35	35	36	38	29	37	33	32	41	32	23
31	33	31	30	33	30	31	32	33	34	37	37	35	32	32	39	37	38	29	37	37	36	42	35	38	37	37	35	40	33	33	32	31	30	26	33	30	21
27	32	34	31	31	33	37	34	34	35	32	27	32	36	43	42	36	41	36	37	43	37	36	42	44	33	40	40	36	39	35	36	38	32	32	34	37	22
29	33	32	34	38	35	30	32	34	36	38	35	37	39	39	36	42	36	38	36	38	37	36	35	35	35	38	38	31	35	35	35	36	36	36	33	32	24
34	32	31	32	32	34	37	35	26	33	43	35	34	34	41	41	40	37	37	38	36	38	41	38	35	36	39	40	40	36	35	38	41	33	33	29	31	26
36	32	29	34	34	38	33	33	35	45	34	37	36	35	37	35	43	38	44	40	37	39	38	34	40	39	41	32	42	37	35	37	40	35	28	35	35	35
33	37	30	38	34	27	38	35	35	39	36	37	37	34	46	44	45	34	39	33	36	35	32	37	37	39	35	38	38	38	43	35	37	40	35	33	32	31
29	36	33	34	34	37	26	41	37	36	38	42	37	50	41	36	40	37	24	40	44	45	33	40	39	28	31	32	36	38	29	37	37	33	35	41	34	32
27	26	30	34	34	27	32	34	35	33	36	38	40	36	34	37	43	35	27	35	39	38	35	32	48	42	32	50	45	34	49	37	39	38	37	38	33	32
32	24	28	34	36	30	36	35	38	34	36	40	35	31	30	45	40	43	41	37	38	44	41	34	39	48	37	30	42	37	37	36	31	38	35	42	38	28
24	31	32	33	34	39	34	39	35	38	38	34	37	26	42	42	40	31	37	41	44	38	40	44	41	26	46	31	35	39	39	40	36	32	30	32	36	21
32	27	33	30	34	34	36	30	40	36	43	36	50	40	37	38	31	31	40	41	40	46	38	37	40	31	40	41	42	37	43	36	44	34	40	47	34	34
33	38	33	24	34	36	39	41	35	43	38	39	40	42	43	33	35	39	42	45	41	40	40	32	32	33	37	40	38	35	37	34	39	34	34	35	32	35
33	36	37	28	37	30	41	36	36	34	20	56	36	33	44	32	37	42	39	41	37	45	44	36	45	44	32	44	36	35	42	29	43	36	24	36	35	24
35	31	35	31	24	37	30	34	36	35	35	28	29	36	32	40	45	43	38	35	40	37	36	41	46	36	34	37	37	31	29	36	32	32	26	32	28	22
33	37	36	30	28	36	34	39	42	35	38	35	49	48	36	40	35	38	38	40	47	43	37	40	45	34	41	40	32	35	30	39	39	39	33	35	35	35
32	38	24	28	31	33	35	42	34	33	44	38	37	36	37	43	48	42	41	37	20	45	49	34	33	41	37	39	47	45	37	43	34	27	42	40	26	22
31	28	27	29	35	36	35	36	35	32	45	37	38	45	40	40	53	44	44	39	45	41	46	40	42	38	38	39	37	36	36	39	36	34	33	33	24	24
31	34	32	34	35	44	31	37	41	31	33	37	42	47	42	43	44	37	40	35	35	34	35	38	39	39	37	36	34	35	47	37	37	35	37	33	29	24
33	35	34	36	34	35	34	36	36	32	35	38	40	39	39	40	42	38	51	41	44	35	44	46	39	42	35	36	39	37	37	38	43	35	33	28	22	20
33	32	32	40	35	37	36	34	36	34	35	37	41	39	39	37	37	29	37	38	37	35	37	39	37	30	37	40	40	32	41	35	32	35	30	30	39	31
35	31	32	34	32	41	39	35	36	38	34	36	37	39	48	36	49	50	35	43	42	32	40	38	38	40	36	42	42	34	34	42	34	37	38	35	38	24
39	34	37	38	33	34	38	35	36	31	35	34	38	37	41	36	37	35	37	38	37	40	34	46	42	39	37	38	36	35	36	37	37	33	40	34	32	19
37	27	36	33	34	28	35	38	33	35	34	40	39	47	38	42	37	47	46	38	37	40	36	40	36	29	37	48	40	36	43	35	37	40	34	32	36	21
37	24	31	35	33	41	34	34	34	40	44	34	37	40	42	38	42	32	46	38	49	36	31	36	36	38	33	39	35	42	38	37	36	35	35	34	34	30
33	33	40	38	30	31	33	30	32	35	33	37	35	44	44	38	46	38	40	36	34	44	40	40	30	29	35	34	32	27	30	34	37	35	38	36	39	35
33	33	36	34	33	34	29	45	33	39	27	42	40	35	41	38	39	39	41	39	35	40	42	38	39	33	43	36	38	30	34	27	32	32	40	40	23	23
29	39	31	31	34	37	32	34	29	38	29	34	40	36	38	38	42	35	38	31	31	39	41	44	38	34	40	35	31	28	36	37	36	30	37	34	32	31
29	33	32	30	34	32	32	32	37	41	30	34	39	40	36	41	28	40	30	30	29	32	38	40	35	38	35	37	31	31	28	31	24	32	29	33	30	21
24	33	33	28	31	32	27	29	26	27	38	36	40	41	33	30	31	30	38	35	38	38	40	36	32	41	32	38	32	28	24	30	26	30	30	30	28	
24	33	30	32	33	31	40	36	32	28	33	28	38	46	38	40	34	35	35	44	34	40	37	36	42	30	34	40	35	26	34	31	35	33	36	36	22	20
22	27	31	33	32	30	34	31	29	33	32	31	31	35	35	40	38	42	37	36	33	33	42	44	36	35	45	35	32	28	33	35	33	31	28	26	34	19
23	23	22	24	32	33	29	28	32	33	36	32	40	36	34	38	35	37	37	36	34	38	32	40	41	36	33	30	26	30	34	33	27	24	23	27	36	
29	32	23	31	27	26	36	30	30	23	30	32	36	40	32	39	36	34	34	35	41	31	33	40	39	38	36	38	26	33	32	32	28	31	28	28	29	
30	27	27	29	26	31	34	37	34	28	29	30	37	36	29	36	37	34	35	32	38	35	36	35	39	38	34	35	35	33	30	23	30	23	34	27	20	

(c)

BIFS ²																																					
19	23	28	31	28	34	30	27	27	30	28	25	29	29	29	32	36	36	32	31	37	24	38	36	27	28	36	33	33	31	29	23	27	31	30	25	19	21
24	22	27	29	25	32	32	30	38	29	28	30	31	35	29	34	30	33	28	28	30	34	38	33	29	27	23	34	32	28	32	32	27	35	31	30	23	21
29	28	31	30	30	32	30	29	37	29	33	29	28	30	34	36	30	38	29	38	31	36	36	34	36	33	30	35	32	30	32	32	31	28	32	33	25	25
29	31	28	30	36	35	33	32	34	34	30	38	28	37	41	41	27	32	35	40	32	35	36	33	35	27	36	28	33	29	27	33	31	25	30	31	31	25
22	25	29	24	31	34	33	34	37	38	18	34	32	36	30	32	40	38	31	31	38	33	37	35	38	29	27	29	31	34	31	32	32	31	31	32	31	27
25	25	29	33	34	34	37	36	40	34	38	43	34	29	34	34	33	35	36	30	31	38	37	30	38	31	31	36	32	36	36	29	33	25	31	30	27	31
20	23	27	35	33	33	28	34	36	34	31	32	34	39	31	32	34	33	31	32	38	32	37	41	30	33	30	28	29	37	33	35	36	31	30	35	30	25
31	33	25	33	36	33	37	29	35	36	37	36	37	31	30	31	37	32	32	24	28	28	29	39	30	33	36	37	38	28	37	29	33	23	30	34	27	28
27	33	35	28	28	31	35	37	30	38	34	31	31	39	30	31	40	36	30	23	28	29	29	29	29	33	32	35	32	39	35	32	32	32	33	31	33	28
	29	37	37	38	36	38	40	33	33	37	35	32	35	36	31	34	30	27	30	30	33	29	34	29	36	36	38	37	37	34	34	29	36	27	32	34	35
24	32	37	31	29	33	33	35	38	32	30	36	35	31	31	32	34	40	32	31	30	33	31	29	31	39	38	38	32	40	37	31	29	27	27	36	29	27
36	28	28	31	32	32	31	28	29	34	34	29	31	34	30	36	34	33	30	25	33	31	36	35	33	32	43	41	41	43	38	37	33	34	36	32	35	37
30	31	31	34	29	33	34	37	38	36	35	32	32	36	37	31	29	35	36	33	33	38	37	38	35	33	39	37	36	31	36	34	36	32	33	29		
27	35	36	33	36	29	37	34	32	33	36	33	35	29	33	36	35	33	32	36	38	33	42	30	33	36	38	38	39	35	33	30	30	36	30	34	30	36
27	37	31	30	35	36	29	36	40	30	40	29	35	31	31	33	31	38	33	32	30	35	33	35	31	33	39	37	34	34	29	34	36	35	34	40	30	33
37	32	31	31	32	31	37	31	39	37	30	35	32	31	37	32	33	38	32	34	30	30	32	37	29	30	37	38	33	34	33	32	29	40	32	41	29	35
38	31	39	30	36	28	39	32	33	37	32	31	32	31	37	34	32	37	32	32	31	38	40	34	25	36	39	33	37	37	38	38	36	39	35	31	34	29
29	39	32	36	29	30	34	30	37	32	37	30	30	31	31	38	36	32	40	36	31	42	38	39	30	32	32	33	33	35	38	34	30	31	38	29	32	29
25	37	41	36	36	33	33	32	38	32	29	31	32	32	37	35	35	36	34	40	37	33	38	38	32	30	33	35	37	37	28	32	33	36	39	33	29	33
33	38	36	41	38	32	38	38	43	36	33	32	35	39	37	38	39	32	31	36	37	40	38	34	37	33	35	35	46	37	41	36	34	36	38	39	30	29
29	31	36	33	38	32	31	37	36	36	35	31	35	33	31	39	38	37	40	32	37	36	35	37	36	38	38	39	32	38	35	35	30	38	35	28	34	30
36	33	34	37	32	34	32	32	38	40	32	38	33	33	39	31	39	37	37	37	38	42	35	38	36	29	37	33	36	38	39	37	37	32	30	35	36	31
32	37	34	37	38	35	35	41	37	37	37	36	37	35	35	36	34	43	36	38	34	38	34	37	36	33	38	32	36	32	33	37	30	35	34	29	31	30
29	38	39	35	30	35	30	40	40	36	38	36	38	30	31	37	35	34	35	33	30	38	41	41	32	39	38	38	36	38	37	35	35	32	32	38	34	27
35	30	31	30	33	30	28	31	37	43	38	38	29	31	31	40	38	36	39	38	39	37	31	38	36	37	38	36	31	37	31	31	29	37	38	35	27	32
30	37	33	38	35	28	31	28	30	38	33	37	32	43	38	37	37	38	39	36	33	38	36	36	36	37	41	38	32	37	33	33	32	34	35	29	27	37
34	31	30	33	37	34	28	43	40	42	32	38	35	39	35	38	32	31	33	30	38	35	37	37	35	32	36	34	36	36	36	32	35	33	28	30	29	28
30	28	30	29	30	34	31	39	32	31	38	39	40	43	37	36	34	39	33	30	41	39	31	38	36	35	31	33	37	38	29	36	33	34	34	36	33	25
34	32	31	38	33	30	30	32	35	30	39	37	32	38	36	32	38	46	35	36	33	31	39	43	38	31	35	30	30	36	32	31	38	30	25	29	37	25
29	30	32	28	35	29	39	33	34	38	32	38	42	41	30	36	34	36	32	40	32	37	33	36	35	33	31	30	37	29	30	32	29	30	34	25	33	28
36	40	39	35	31	28	29	33	34	45	43	34	32	34	37	38	36	46	39	30	33	33	34	27	30	28	32	32	35	39	31	29	34	29	27	31	31	25
28	33	30	28	38	35	29	32	31	38	39	29	40	32	36	31	36	36	37	32	39	33	34	32	28	30	33	31	29	34	28	34	27	33	28	36	32	24
33	29	28	29	27	33	32	32	35	32	34	33	31	32	29	36	30	38	30	32	33	32	35	34	31	37	27	31	34	34	35	36	31	32	32	27	24	23
31	31	32	25	31	35	31	35	29	28	29	29	32	37	34	30	29	32	35	36	37	37	39	31	34	29	29	32	29	33	33	32	30	27	29	25	27	30
31	31	29	30	24	29	31	28	29	27	29	29	35	36	30	23	35	35	35	36	35	34	34	35	35	29	33	38	28	30	34	28	29	35	27	25	25	25
25	29	28	34	29	31	34	29	32	30	29	30	36	35	30	37	28	28	34	39	32	30	37	33	37	34	30	29	27	27	32	30	29	29	32	28	24	25
24	29	29	30	33	27	28	25	27	28	34	34	32	33	40	28	29	30	35	39	30	35	31	36	28	31	29	31	31	25	31	33	32	25	25	25	20	23
22	28	29	28	28	28	25	27	27	33	33	31	29	32	33	28	28	28	30	30	28	28	33	29	24	21	24	30	32	30	31	32	30	24	28	25	29	18

(d)

BIFP																																						
30	22	23	27	28	36	38	31	30	39	31	37	35	30	34	34	34	35	39	41	36	38	35	37	36	45	35	39	35	36	34	37	27	30	30	29	27	22	
31	36	32	27	38	19	31	36	37	31	37	35	37	43	35	37	40	35	37	39	32	38	37	38	35	34	34	35	31	36	35	30	31	34	37	24	27	24	
31	27	29	31	32	28	31	32	38	32	32	35	36	38	36	35	40	38	37	37	35	35	43	30	34	32	38	37	31	34	35	32	36	29	30	30	27	23	
29	34	32	32	31	31	35	36	35	34	39	32	37	43	37	37	39	38	35	36	38	26	39	35	35	39	35	37	40	44	31	27	32	24	24	29	25	32	
26	32	32	31	30	40	28	35	36	32	37	39	41	35	37	39	38	37	36	38	32	26	34	27	36	32	36	34	34	36	29	38	32	30	37	30	26	25	
23	34	32	31	32	36	28	36	34	44	45	31	37	39	35	39	36	38	35	45	43	40	37	35	35	37	32	38	38	37	25	34	32	32	34	30	32	27	
31	39	32	34	35	37	37	38	40	37	35	32	38	39	39	41	39	39	35	38	38	43	35	31	32	39	37	36	38	38	41	36	32	31	31	36	31	35	
37	31	42	34	35	37	36	39	34	45	37	38	40	40	43	34	36	39	43	41	32	40	37	38	44	42	35	30	30	31	28	39	28	35	27	35	34	27	
27	32	36	35	36	39	40	39	28	35	37	38	42	39	48	37	32	39	39	39	36	38	41	38	41	41	30	37	37	41	29	30	35	28	35	31	39	34	
37	35	34	27	36	35	34	36	31	34	38	39	36	40	37	40	48	41	37	39	29	44	40	36	32	31	28	30	38	41	34	34	32	28	37	37	36	34	
32	39	37	32	37	36	46	35	24	37	48	37	37	36	30	37	34	38	36	39	36	45	38	43	35	39	29	29	41	40	39	42	38	31	29	31	32	31	
35	39	37	31	35	37	37	38	43	37	40	44	38	42	29	40	37	37	41	37	35	40	42	39	39	36	29	39	34	36	31	44	34	31	37	39	28		
30	31	40	32	39	37	40	29	36	39	42	43	44	44	40	34	51	37	38	52	37	39	36	43	46	37	31	37	34	42	30	39	36	28	31	36	36	26	
25	38	36	37	37	39	35	34	37	37	44	37	38	39	39	39	36	50	39	46	38	41	36	42	38	43	37	29	29	39	39	30	28	34	34	40	39	40	
24	37	35	36	37	37	34	38	40	41	41	39	39	37	37	48	34	36	39	39	38	41	39	40	39	40	44	40	29	37	40	42	32	39	34	42	34	35	
24	42	38	36	36	37	40	37	41	37	38	48	36	51	38	44	36	35	41	40	38	37	39	40	41	38	38	37	44	40	37	31	37	40	37	42	37	36	
40	36	29	37	41	37	31	46	41	48	37	35	42	31	35	37	55	45	48	53	39	35	37	37	39	39	50	29	41	30	43	41	39	40	28	28	32	29	
32	37	40	36	41	39	43	38	44	37	49	38	39	43	41	34	34	35	36	37	51	42	39	32	52	39	42	38	36	28	34	34	29	41	27	31	44	28	
36	35	39	42	39	31	40	37	36	37	37	37	35	35	37	39	42	37	46	49	41	44	39	42	43	36	48	41	39	42	36	42	25	32	43	37	38	43	
35	32	38	37	40	28	40	46	39	45	39	32	37	39	41	40	38	50	49	38	51	49	32	42	36	34	39	40	29	39	39	30	39	31	27	36	40	31	
35	36	29	26	37	39	42	38	41	36	44	43	40	44	50	36	37	31	31	37	37	34	31	34	42	46	41	35	24	32	37	39	31	34	28	38	36	34	
35	34	41	28	37	39	37	37	38	38	32	44	49	38	32	44	48	42	50	40	39	49	27	35	36	42	38	37	42	36	34	46	37	40	41	35	34	38	
37	37	41	31	38	40	39	37	37	45	43	37	40	40	38	40	38	42	32	43	37	44	39	32	38	36	36	38	26	52	42	28	49	40	39	37	32	29	36
37	38	35	34	40	37	40	37	41	37	38	36	39	40	39	42	42	58	34	36	38	40	40	39	45	40	43	35	41	39	39	30	28	37	37	36	29	41	
38	34	35	40	38	30	45	42	37	42	39	42	37	38	35	31	41	35	44	34	43	39	38	34	45	37	34	30	39	37	42	42	27	29	36	39	36	38	
26	35	31	35	30	29	38	35	35	39	39	37	44	38	27	49	39	37	38	49	48	34	36	37	44	37	40	31	27	42	32	38	27	27	35	29	43	34	
42	38	41	32	38	45	40	35	38	39	41	39	40	28	37	40	35	39	48	31	39	37	40	43	43	41	39	39	29	37	42	30	35	28	23	37	35	35	
35	37	39	24	35	34	37	34	36	37	31	41	49	38	35	53	29	35	30	53	35	46	38	43	40	39	28	36	28	37	32	39	36	38	36	35	37	32	
39	31	36	29	27	30	39	30	45	41	37	36	39	38	40	39	37	30	39	43	30	46	39	41	31	30	26	37	37	32	36	39	36	38	39	36	34		
31	35	28	31	26	30	34	34	40	39	34	39	32	40	37	38	39	37	48	43	40	43	39	41	38	32	48	36	38	36	39	38	31	40	40	31	37	29	
32	39	26	32	31	27	35	41	40	37	40	37	39	37	37	37	45	44	40	42	41	40	40	40	39	43	43	37	44	32	36	38	26	38	32	35	36	30	
37	37	36	30	31	38	34	28	36	42	37	41	41	39	40	34	35	39	38	35	39	39	37	36	39	40	38	38	37	37	28	35	32	30	36	29	17		
31	24	24	31	34	34	30	34	40	28	42	41	39	38	44	35	31	38	38	36	29	39	41	40	29	38	30	39	35	39	31	37	32	26	37	34	31	32	
34	18	34	39	28	36	35	27	35	30	38	41	35	37	36	37	40	37	36	35	30	34	41	31	29	27	37	40	28	35	32	29	28	30	37	32	30	36	
34	29	30	32	37	36	37	34	32	35	29	36	35	30	29	44	38	35	35	35	35	41	36	38	35	34	35	32	35	34	36	34	29	18	23	34	29	30	
31	34	31	38	27	29	35	34	32	37	38	37	26	32	37	34	40	32	35	28	29	27	30	32	31	31	26	35	34	34	28	39	36	25	23	29	31	30	
36	32	30	36	29	27	32	32	28	32	34	35	34	37	35	28	43	37	40	40	32	31	30	38	39	31	37	36	37	30	35	34	32	23	24	31	31	26	
26	26	23	28	27	29	28	19	34	23	28	31	31	36	31	28	35	35	38	31	32	28	43	36	31	30	35	39	28	26	32	26	28	26	23	29	24	26	

Fonte: Elaboração própria

(b)

BOFS ²																				BOFI ²																			
32	32	26	30	30	34	35	37	34	32	42	38	36	34	37	34	32	35	36	30	24	26	26	25	28	26	28	30	34	29	26	30	26	31	29	28	30	35	34	24
32	28	34	30	36	28	37	34	30	38	35	38	36	42	40	35	38	36	34	32	27	34	35	31	38	36	38	36	37	34	36	34	34	34	32	33	35	36	38	32
39	32	36	35	33	28	35	37	30	34	38	36	34	38	38	41	38	32	34	32	27	33	32	33	33	36	40	36	38	37	36	38	38	38	34	35	36	38	37	27
34	38	35	35	36	38	36	38	38	41	31	40	43	46	41	36	42	34	32	34	26	32	34	32	35	44	42	40	40	40	39	40	37	36	38	40	37	40	37	28
36	38	38	40	39	45	41	35	38	36	44	46	46	40	40	38	37	30	36	35	30	35	33	37	40	42	36	40	44	40	43	40	42	38	36	36	35	36	35	32
38	37	37	36	37	42	43	28	38	40	35	38	40	42	42	41	36	34	34	40	28	46	30	38	38	38	39	43	38	38	41	40	41	42	38	38	44	37	36	24
31	40	39	38	40	43	42	38	40	46	36	41	40	44	42	38	39	40	35	35	28	43	36	42	38	39	40	43	41	42	40	44	36	40	40	38	43	36	38	34
41	39	40	36	38	38	38	42	40	40	48	45	41	40	41	44	41	36	38	38	24	36	44	42	37	39	44	40	39	41	38	38	42	38	41	37	38	42	38	26
40	35	38	40	40	44	38	42	41	39	40	40	40	44	39	46	36	49	41	40	22	34	36	40	36	41	39	42	40	42	42	41	38	40	40	40	36	36	38	29
38	40	38	38	40	40	43	38	40	41	40	38	38	44	45	42	38	42	38	24	36	37	40	36	40	40	40	40	40	39	40	38	40	41	40	34	40	36	36	
37	37	40	39	41	44	35	41	39	42	40	39	42	35	41	47	40	38	42	36	22	37	37	42	40	39	39	41	40	41	42	40	40	38	44	38	36	36	36	34
36	41	38	41	41	42	36	38	42	38	41	39	48	45	44	40	41	40	38	38	30	34	38	35	44	45	36	38	41	40	42	39	38	32	38	39	38	38	40	30
38	40	38	42	38	42	38	42	44	48	44	42	45	48	42	43	40	34	43	38	29	34	32	36	40	43	44	39	40	41	44	41	41	40	39	39	40	38	36	35
34	34	35	38	40	43	39	40	41	38	44	42	40	45	39	38	40	38	34	38	28	34	38	32	38	42	36	39	40	36	38	38	38	42	42	42	38	36	38	32
32	33	35	38	41	41	40	40	42	40	38	41	42	40	46	48	41	38	36	39	30	28	26	37	38	37	39	38	38	42	41	36	48	41	42	36	34	34	35	36
30	34	36	36	40	40	40	38	40	41	36	38	41	40	39	44	37	40	38	36	24	33	32	32	42	36	40	44	37	38	40	38	36	38	35	35	36	36	32	34
30	32	35	38	39	38	34	34	32	39	38	40	38	36	35	38	37	26	37	35	22	30	36	37	38	41	38	40	39	38	42	38	38	36	34	36	35	32	36	32
30	34	38	43	38	39	40	46	39	34	39	38	41	32	32	33	30	28	30	29	22	30	32	34	35	34	39	38	36	34	36	35	35	35	34	38	38	40	35	30
30	35	37	34	40	42	40	40	35	34	32	35	33	30	34	30	31	28	30	28	28	32	32	32	32	34	38	32	32	35	36	34	37	32	37	38	32	36	33	34
28	31	32	36	34	38	37	34	36	46	40	28	36	35		31	33	28	30	29	33	28	32	30	29	29	35	34	38	33	32	34	35	35	33	35	30	33	32	26

Fonte: Elaboração própria

Figura 49 – Brita 02 (a) B2FS¹ e B2FI¹ e (b) B2FS² e B2FI²

(a)

B2FS ¹																	B2FI ¹																						
24	36	30	28	34	33	29	35	29	32	36	38	37	35	28	35	39	27	25	22	25	26	30	36	36	32	38	36	35	22	32	30	36	31	28	26	25	38	26	
32	34	28	27	34	35	43	38	42	39	46	36	43	38	27	30	32	27	33	30	29	26	26	35	34	26	32	26	34	30	36	40	33	36	30	33	30	36	28	31
25	34	32	35	40	38	38	37	40	38	38	38	40	30	28	42	30	29	29	28	25	30	44	37	30	34	28	34	30	28	36	32	35	32	38	34	34	28	36	40
28	40	33	36	37	37	50	34	40	38	39	43	40	39	36	34	38	38	30	32	26	34	37	42	38	34	38	36	35	34	35	32	30	36	46	44	34	30	32	36
22	39	45	36	39	34	35	39	47	52	49	48	42	40	39	32	40	38	40	43	40	39	34	34	42	36	38	32	34	30	48	36	34	40	42	34	40	38	40	28
29	36	40	45	42	42	44	42	48	42	36	47	39	40	40	40	36	33	39	34	30	32	45	36	38	42	36	35	36	34	40	34	36	36	40	43	32	34	40	43
35	37	38	45	43	42	39	44	40	44	36	40	38	40	40	52	40	29	39	37	33	37	34	35	34	40	36	34	35	38	44	34	45	46	34	35	28	32	32	40
40	35	37	39	44	43	43	50	43	49	42	49	44	43	44	43	42	39	39	36	30	33	40	38	38	44	34	46	42	43	38	35	42	32	35	43	34	30	32	26
35	39	38	35	35	47	43	43	42	44	45	44	50	43	39	46	42	36	36	37	28	36	30	32	40	34	34	34	38	38	41	37	35	44	42	41	32	32	26	36
38	52	38	38	42	42	49	47	44	45	44	42	44	40	38	40	39	33	36	43	32	34	34	32	40	40	40	32	39	37	38	37	35	40	35	36	32	32	36	36
36	38	40	50	43	42	47	45	42	45	46	45	49	43	47	43	38	40	38	34	36	38	32	36	40	35	32	34	36	37	36	37	38	36	38	32	34	32	38	30
37	37	42	39	53	40	48	44	48	45	44	44	43	43	43	39	38	37	38	32	28	34	40	40	36	42	40	36	34	37	35	38	32	34	40	35	42	33	30	36
23	36	38	42	45	42	37	45	44	42	40	44	40	44	44	34	42	35	34	33	33	32	34	36	40	34	34	28	38	34	35	38	34	42	34	34	30	31	32	36
34	38	43	42	44	43	40	42	43	48	45	49	43	43	43	40	32	37	30	30	32	32	35	46	34	38	40	44	48	36	34	36	43	34	32	40	45	30	36	
27	43	43	38	39	44	43	39	39	45	44	49	47	36	36	38	39	45	36	28	30	32	34	36	32	38	45	34	38	40	42	36	43	32	34	30	35	38	33	30
27	34	37	38	38	39	47	49	43	39	42	44	36	35	35	47	29	27	38	33	30	28	42	32	38	40	34	32	36	32	35	28	35	42	41	34	32	41	40	38
25	33	36	30	36	40	38	46	40	40	40	47	38	38	38	32	40	32	38	28	28	41	30	38	44	35	34	38	33	32	28	30	34	34	35	37	38	36	35	38
26	30	30	37	35	36	38	38	42	42	34	36	42	35	35	42	32	36	33	27	32	40	34	36	30	40	36	38	32	34	40	40	32	33	36	35	43	35	36	30
29	29	34	32	35	37	37	36	37	38	38	37	43	38	38	35	34	30	30	23	34	30	34	34	35	38	40	35	40	32	28	31	30	38	30	35	34	35	36	32
30	32	33	32	40	32	34	34	38	36	35	39	29	37	37	34	32	34	29	22	28	28	35	28	34	34	28	38	40	28	32	36	33	26	40	28	32	24	28	30

(b)

B2FS ²																	B2FI ²																						
34	31	30	37	43	44	36	44	39	44	40	42	40	37	36	35	33	33	33	37	38	28	28	33	35	36	32	40	35	34	29	35	30	26	26	34	36	28	25	
35	32	31	37	35	39	43	44	45	45	43	39	45	38	36	33	39	39	39	30	36	34	36	32	35	30	36	34	40	34	38	35	36	36	34	30	24	28		
36	33	38	38	37	42	55	40	39	42	46	42	44	39	38	36	47	33	33	26	33	34	32	40	38	34	44	33	40	35	38	34	36	36	34	30	36	33	22	
35	34	43	55	38		40	44	46	43	46	51	42	42	40	33	37	38	39	40	34	44	35	42	40	34	35	36	38	34	32	40	35	38	40	40	34	34	26	
37	36	43	51	37	45	36	47	48	44	42	37	52	39	33	39	39	33	39	34	36	42	40	35	36	45	36	40	36	44	36	38	42	42	41	32	30	34	32	
38	39	39	55	42	53	44	46	44	42	48	33	40	50	42	42	38	38	42	32	32	40	38	40	28	38	34	38	40	35	34	34	38	37	38	32	36	30	25	
45	38	43	42	38	38	44	46	46	43	40	44	40	35	36	33	40	36	37	37	37	35	40	32	34	32	43	40	41	36	38	36	40	38	45	43	40	35	38	26
39	42	47	37	44	39	46	41	41	40	40	41	43	43	43	43	40	40	38	38	30	32	33	35	36	38	37	46	40	38	36	40	38	38	34	38	36	36	44	35
39	40	42	37	51	38	40	42	41	43	39	42	40	49	40	36	35	44	39	32	40	38	34	40	35	35	38	38	36	32	39	39	38	40	38	30	36	34	32	24
35	42	50	44	42	45	43	41	39	42	39	41	41	46	40	42	37	44	37	42	27	38	34	38	36	43	44	36	37	38	39	39	32	40	46	40	32	40	36	28
34	42	48	43	40	40	42	41	41	43	42	40	40	48	46	45	45	42	40	43	30	38	30	38	38	36	44	34	36	37	40	41	34	36	36	32	32	36	32	32
40	42	38	46	43	43	42	39	33	42	37	38	37	42	39	46	40	39	36	37	37	34	34	36	36	42	36	43	35	40	36	37	35	35	36	44	38	34	35	29
31	40	43	44	44	40	42	36	35	40	37	39	38	43	45	46	40	43	37	38	34	32	38	34	38	44	40	42	34	48	30	40	35	42	42	36	36	36	38	26
31	39	37	39	43	44	47	53	45	44	42	42	47	44	39	39	47	40	45	37	24	32	36	36	40	36	42	40	44	36	30	35	44	40	48	34	32	35	35	26
31	39	36	44	45	38	48	46	43	40	43	40	43	47	39	36	44	39	35	38	31	30	32	34	44	38	41	35	35	32	38	40	34	32	32	32	42	34	32	28
30	36	33	38	37	39	46	48	39	38	39	39	40	40	39	42	40	39	35	36	27	31	32	34	38	35	35	34	32	38	35	35	40	45	38	44	38	32	30	40
28	38	33	34	38	35	37	44	39	37	40	35	38	39	47	37	44	33	32	25	34	32	44	32	40	32	37	36	42	38	30	35	38	32	38	38	30	32	28	
34	36	26	31	33	36	45	34	37	39	39	42	39	37	37	38	33	33	33	30	26	28	32	32	44	44	36	38	34	35	36	35	34	36	35	32	30	32	24	
25	32	35	30	32	32	31	39	37	42	35	37	37	37	37	36	35	34	33	22	22	27	28	34	32	32	35	38	34	34	43	36	32	35	36	38	36	30	31	28
30	33	32	31	31	33	36	43	33	44	37	30	38	40	36	33	25	32	30	22		28	26	28	35	28	34	34	39	36	32	28	36	30	31	30	36	35	32	22

Fonte: Elaboração própria