

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**KARINA COMPARSI AZZOLIN**

**COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO COM VARIAÇÃO DO  
AGREGADO GRAÚDO A PARTIR DO ENSAIO ESCLEROMÉTRICO**

**Alegrete  
2019**

**KARINA COMPARSI AZZOLIN**

**COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO COM VARIAÇÃO DO  
AGREGADO GRAÚDO A PARTIR DO ENSAIO ESCLEROMÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Luis Eduardo Kostas

**Alegrete  
2019**

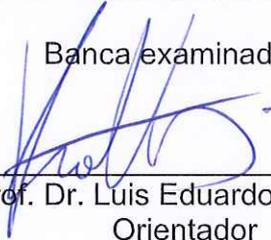
KARINA COMPARSI AZZOLIN

**COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO COM VARIAÇÃO DO  
AGREGADO GRAÚDO A PARTIR DO ENSAIO ESCLEROMÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Civil da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

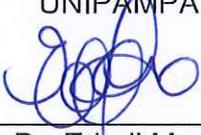
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27/11/2019

Banca examinadora:



---

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Ederli Marangon  
Unipampa



---

Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia  
Unipampa

Dedico este trabalho à minha família, meus pais Fabio e Marlei e ao meu irmão Bruno.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, pelo apoio emocional, especialmente meus pais, Marlei e Fábio, e meu irmão, Bruno, pela compreensão nos momentos em que não pude estar presente em família, pelo afeto transmitido à distância e pelo suporte financeiro. Obrigada por tudo sem vocês eu nada conquistaria.

Aos meus amigos que sempre se fizeram presentes, formamos uma família em Alegrete para poder suportar as dificuldades nesses anos de Unipampa. Entretanto, uma pessoa se tornou imprescindível em todos esses anos, minha amiga Ana Carolina Capato, meu muito obrigada por estar presente em todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Luis Eduardo Kostaski pelo incentivo, paciência e compreensão durante os dois últimos semestre. E também a Nadine Ficher por toda a ajuda durante os ensaios e análise dos resultados.

A todos que de alguma forma contribuíram para a chegada deste momento, meu mais sincero muito obrigada!

## RESUMO

Neste trabalho se apresenta um estudo sobre a variação espacial da dureza superficial do concreto, e sua relação com a resistência à compressão. Para a pesquisa será utilizado um mesmo traço em duas misturas de concreto, uma utilizando um agregado graúdo com dimensão máxima de 12,5 mm e a outra com agregado de 25 mm. O objetivo é identificar a interferência que essa variação no tamanho do agregado graúdo exerce nas propriedades analisadas do concreto. Foram concretados corpos de prova cilíndricos, para o ensaio de compressão axial, e prismas, para serem submetidos ao ensaio não destrutivo. A detecção da dureza superficial é feita pelo ensaio do esclerômetro de reflexão, sendo aplicados os pontos de ressaltos com uma proximidade de até 10 mm, possibilitando o mapeamento das zonas mais e menos duras. O concreto com traço correspondente à brita de maior diâmetro apresentou maior heterogeneidade e dureza superficial. A partir do índice esclerométrico é feita uma correlação com a resistência à compressão, baseada nas equações de correlação desenvolvidas em pesquisas anteriores. Com isso, os resultados obtidos são avaliados e relacionados com os resultados de ensaios destrutivos, de rompimento de corpos de prova padrão, e ajustados por curvas de distribuição estatística, analisando o efeito da variação da dimensão máxima do agregado graúdo. O concreto produzido com o agregado graúdo menor apresentou resultados semelhantes aos de compressão axial, já o concreto com agregado de maior diâmetro apresentou maior divergência nos resultados de dureza e correlação entre as diferentes faces do prisma.

Palavras-chave: esclerômetro de reflexão; resistência à compressão; distribuição espacial;

## **ABSTRACT**

This paper presents a study about the spatial variation of the hardness of a concrete surface and its relationship with the compressive strength. For the research will be used the same trace in two concrete mixtures, one using a coarse aggregate with maximum dimension of 12.5 mm and the other with 25 mm aggregate. The objective is to identify if the variation in coarse aggregate size exerts influence on the analyzed properties of concrete. Cylindrical specimens were made for the axial compression test and prisms to be subjected to the non-destructive test. The detection of surface hardness is made by the reflection sclerometer test. The bounce points were located with a proximity of up to 10 mm, allowing to map the hardness in the surface of the specimens. From the sclerometric index is made a correlation with the compressive strength, based on the correlation equations developed in previous research. The concrete with a trace corresponding to the gravel of greater granulometry presented greater heterogeneity and surface hardness. Thus, the obtained results are evaluated and related to the results of destructive tests of rupture of standard specimens. Then the distribution are adjusted by statistical distribution curves. Analyzing the effect of the variation of the maximum dimension of the coarse aggregate the concrete producing with the smaller coarse aggregate presented results similar to those of axial compression, whereas the larger gravel presented greater divergence in the hardness and correlation results between the different faces of the prism.

**Keywords:** reflection sclerometer; compressive strength; spatial distribution;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Distribuição espacial da dureza superficial do concreto.....	18
Figura 2– Esclerômetro de reflexão. ....	19
Figura 3 – Representação esquemática do ensaio de esclerometria.....	20
Figura 4 – Bigorna de aferição do esclerômetro.....	21
Figura 5 – Agregado miúdo.....	26
Figura 6 – Curva granulométrica agregado miúdo. ....	27
Figura 7 – Agregado graúdo.....	27
Figura 8 – Curva granulométrica - Brita 0. ....	28
Figura 9 – Curva granulométrica - Brita 2. ....	28
Figura 10 – Curva granulométrica cimento CP V - ARI.....	30
Figura 11 – Fluxograma da metodologia.....	31
Figura 12 – Ensaio de abatimento do concreto com a) brita 0 e b) brita 2. ....	32
Figura 13 – Corpos de prova a) Cilíndrico e b) Prisma. ....	33
Figura 14 – Malha para aplicação do ensaio esclerométrico.....	34
Figura 15 – Esquema de nomenclatura dos prismas. ....	34
Figura 16 – Corte transversal: a) Esquema de corte e b) Processo de corte.....	35
Figura 17 – Dureza superficial Traço I – Brita 0. ....	37
Figura 18 – Histogramas Traço I – Brita 0.....	38
Figura 19 – Traço I: CP 2 - Laterais. ....	39
Figura 20 – Traço I: CP 2 - Transversais. ....	40
Figura 21 – Traço I: CP 2 – Transversal 1-2. ....	41
Figura 22 – Traço I: CP 2 – Transversal 3-4. ....	42
Figura 23 – Traço I: CP 2 – Transversal 3-4. ....	43
Figura 24 – Dureza superficial Traço II – Brita 2. ....	44
Figura 25 – Histogramas Traço II – Brita 2.....	45
Figura 26 – Traço II: CP 2 - Laterais. ....	46
Figura 27 – Traço II: CP 2 - Transversais.....	47
Figura 28 – Traço II: CP 2 – Transversal 1-2. ....	48
Figura 29 – Traço II: CP 2 – Transversal 3-4. ....	49
Figura 30 – Traço II: CP 2 – Transversal 3-4. ....	50
Figura 31 – Parâmetros considerados na distribuição de Gauss. ....	54
Figura 32 – Parâmetros considerados na distribuição de LogNormal. ....	55

Figura 33 – Distribuição dos dados superficiais – Traço I. ....	56
Figura 34 – Distribuição dos dados laterais – Traço I: CP 2. ....	57
Figura 35 – Distribuição dos dados transversais – Traço I: CP 2.....	58
Figura 36 – Distribuição dos dados superficiais – Traço II. ....	59
Figura 37 – Distribuição dos dados laterais – Traço II: CP 2. ....	60
Figura 38 – Distribuição dos dados transversais – Traço II: CP 2.....	61
Figura 39 – Semivariograma Traço I – CP 2. ....	62
Figura 40 – Semivariograma Traço II – CP 2. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Resistência à compressão para diferentes granulometrias. ....	16
Tabela 2 – Equações propostas por diferentes autores para correlação do IE com $f_c$ . .....	25
Tabela 3 – Módulo de finura e dimensão máxima característica dos agregados. ....	29
Tabela 4 – Massa específica dos agregados. ....	29
Tabela 5 – Traço utilizado na pesquisa. ....	32
Tabela 6 – Resultados dos ensaios à tração por compressão diametral e compressão. ....	36
Tabela 7 – Análise de dados - Traço I. ....	51
Tabela 8 – Variação dos dados - Traço I. ....	52
Tabela 9 – Análise de dados - Traço II. ....	52
Tabela 10 – Variação dos dados - Traço II. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

fc – resistência à compressão

IE – Índice esclerométrico

NBR – Norma Brasileira

CP – corpo de prova

C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.2 Objetivos .....	14
1.2.1 Objetivo geral .....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA .....	15
2.1 Influência do agregado graúdo nas propriedades físicas do concreto .....	15
2.2 Distribuição espacial da resistência à compressão do concreto .....	16
2.3 Ensaio não destrutivos .....	18
2.3.1 Ensaio de esclerometria de reflexão .....	19
2.3.2 Método de ensaio .....	19
2.3.3 Vantagens e Desvantagens .....	21
2.3.4 Aplicações .....	22
2.3.5 Fatores Influentes.....	22
2.3.5.1 Tipo de cimento .....	22
2.3.5.2 Tipo e dimensão do agregado.....	22
2.3.5.3 Umidade da superfície.....	23
2.3.5.4 Textura da superfície.....	23
2.3.5.5 Carbonatação .....	23
2.3.5.6 Idade do concreto.....	24
2.3.5.7 Orientação do instrumento .....	24
2.3.6 Acurácia .....	24
2.3.6 Correlação entre o índice esclerométrico e a resistência a compressão .....	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 Materiais.....	26
3.2 Método .....	31
4 RESULTADOS .....	36
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	51
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	64
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	64
REFERÊNCIAS.....	66

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto devem ser examinadas com um nível elevado de precisão e detalhe para que sua segurança seja garantida. Para isso se deve realizar a verificação se o concreto utilizado na execução da estrutura está atendendo as especificações de projeto. Evangelista (2002) afirma que essa inspeção é feita usualmente com corpos de prova cilíndricos ou cúbicos, rompendo-os à compressão após atingirem a idade de 28 dias, obedecendo as normas técnicas vigentes em cada país. Embora confiáveis e mundialmente aceitos, esses ensaios apresentam a desvantagem de os corpos-de-prova não representarem de maneira fidedigna o concreto existente na estrutura, devido às diferentes condições de lançamento, compactação e cura (MACHADO, 2005).

É nesse contexto que a utilização dos ensaios não destrutivos se torna uma alternativa pelo fato de, conforme Samaniego (2014), serem de fácil execução, produzirem resultados rápidos e, principalmente, não causarem danos que comprometam o desempenho da estrutura durante a execução do teste.

Esses ensaios, entretanto, devem ser realizados seguindo procedimentos adequados e seus resultados analisados com cuidado, uma vez que eles são afetados por diversos fatores, sendo alguns deles relacionados com a própria resistência à compressão do concreto, enquanto outros são inerentes ao próprio ensaio. Para estimar a resistência à compressão do concreto torna-se necessário conhecer a relação entre os resultados dos ensaios in loco e a resistência do concreto, obtida a partir de curvas determinadas experimentalmente para os materiais correntemente empregados na região (MACHADO, 2005; EVANGELISTA, 2002).

Para a presente pesquisa, utilizar-se-á o ensaio do esclerômetro de reflexão, o qual disponibiliza o índice esclerométrico cuja unidade é adimensional. O martelo Schmidt, como também é chamado, tem por objetivo verificar a dureza superficial do concreto. A partir do índice resultado do ensaio, pode-se fazer correlações a fim de encontrar a resistência à compressão da estrutura analisada.

Entretanto, no Brasil ainda são poucos estudos sobre esse tema e nem todos os ensaios não destrutivos empregados têm seus procedimentos de realização normalizados pela ABNT (EVANGELISTA, 2005). A NBR 7584 (2012) estabelece o procedimento para o ensaio do esclerômetro, porém a curva de correlação

disponibilizada pela norma não é referente ao padrão de materiais encontrados no Brasil. Por isso, deverão ser utilizadas equações que correlacionem a dureza superficial com a resistência à compressão, as quais são produtos de pesquisas realizadas anteriormente e se aproximam das condições da realidade na região em que o concreto será produzido.

O outro ponto de estudo é o fato de o concreto apresentar características heterogêneas em uma ampla gama de escalas de comprimento. Essa heterogeneidade em multiescala afeta o desempenho mecânico da estrutura, como rigidez e resistência mecânica, e a sua degradação, danos, fraturas e falhas (CONSTANTINIDES; ULM; VLIET, 2003). A partir dos pontos de aplicação do martelo Schmidt, será possível obter uma visualização dessa heterogeneidade que o concreto apresenta.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Estudar a resistência de uma estrutura de concreto, definida por meio do ensaio esclerométrico, e analisar a variação destes resultados quando há mudança na dimensão do agregado graúdo que o constitui.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Verificar a distribuição espacial da resistência e dureza superficial de uma estrutura de concreto;
- Comparar os valores da resistência à compressão encontrados a partir do ensaio esclerométrico com a resistência encontrada pelo rompimento de corpos cilíndricos;
- Identificar a influência da variação da dimensão do agregado graúdo nos resultados de resistência à compressão e índices esclerométricos.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Devido a heterogeneidade da micro e macroestrutura do concreto, ocorrem variações de resistência à compressão axial em sua superfície, apresentando regiões mais resistentes e outras menos, o que pode afetar a estrutura de forma significativa numa escala global. Esse conceito referente à não homogeneidade de uma peça de concreto e a forma que pode ser feito o mapeamento da resistência à compressão serão discutidos a seguir.

### 2.1 Influência do agregado graúdo nas propriedades físicas do concreto

De acordo com Bauer (2000) os agregados exercem grande interferência no concreto, sendo cerca de 80% do peso e 20% do custo de concreto estrutural sem aditivos. Mehta e Monteiro (2008) também tratam sobre a grande influência do agregado, afirmando que esse é o principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto, de forma que essas propriedades estão relacionadas principalmente com a densidade e resistência do agregado.

O conhecimento de certas características dos agregados é uma exigência para a dosagem dos concretos. A massa específica é diretamente proporcional a resistência à compressão do concreto. A forma do grão do agregado, caracterizada pela granulometria e textura, também influi nas propriedades do concreto. As características dos agregados, importantes para a tecnologia dos concretos, são decorrentes da microestrutura do material. (RIBEIRO, 2015)

Nesse contexto, Mehta e Monteiro (2008) asseguram que a condição da composição química e mineralógica do agregado é menos influente nas propriedades do concreto do que as características físicas, como volume, tamanho e distribuição dos poros, forma e textura do material.

No que se refere à resistência à compressão, Bauer (2000) afirma que esta depende do fator água/cimento, o qual é afetado pela distribuição granulométrica do agregado, já que a alta porcentagem de material fino exige uma maior quantidade de água de amassamento e de cimento. Isso ocorre porque os agregados muito finos necessitam de mais água para conseguir trabalhabilidade necessária ao tipo de concreto desejado. (BAUER, 2000)

Assim como Bauer (2008), Mehta e Monteiro (2008) também garantem que a granulometria do agregado influencia indiretamente na resistência do concreto, pois a fração de partículas alongadas e achatadas cresce proporcionalmente ao aumento da dimensão dos grãos. Propiciando o acúmulo de filme de água na superfície das partículas e, conseqüentemente, tornando a zona de transição na interface pasta-agregado mais frágil.

Katayama (2016) realizou um estudo sobre o quão influente a dimensão das partículas do agregado graúdo são em relação as propriedades do concreto. Os resultados obtidos, descrito na Tabela 1, indicaram que o concreto cuja proporção de brita 0 é menor, obteve maior resistência à compressão, da mesma forma quanto maior a proporção de brita 2 menor a resistência encontrada.

Tabela 1– Resistência à compressão para diferentes granulometrias.

<b>Traço 1</b>	<b>Traço 2</b>	<b>Traço 3</b>
50% Brita 0	25% Brita 0	25% Brita 0
25% Brita 1	50% Brita 1	25% Brita 1
25% brita 2	25% brita 2	50% brita 2
Resistência média à compressão		
46,45 MPa	41,36 MPa	40,72 MPa

Fonte: Elaboração própria (2019) com base em Katayama (2016).

A partir dos dados presentes na Tabela 1, se constatou o que Aïtcin (1998) já havia afirmado, uma granulometria menor irá gerar, geralmente, um concreto mais resistente à compressão, pois o processo de redução dos grãos elimina defeitos, como poros grandes, microfissuras e inclusões de minerais moles.

## **2.2 Distribuição espacial da resistência à compressão do concreto**

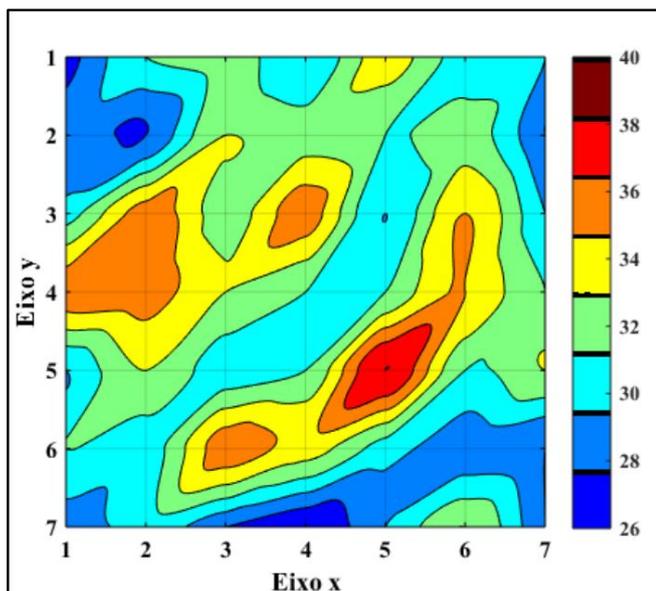
Embora o concreto seja o material estrutural mais amplamente usado, sua microestrutura é heterogênea e altamente complexa. As relações microestrutura-propriedade do concreto não estão ainda completamente desenvolvidas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Constantinides e Ulm (2007) realizaram pesquisas e associaram o fato do comportamento mecânico se apresentar de forma heterogênea ao comportamento nanogranular do Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), influente na

maioria das propriedades físicas e mecânicas do concreto endurecido. O C-S-H tem seu comportamento impulsionado pelas forças de contato entre partículas, o que acaba gerando regiões microestruturais mais densas e menos porosas que outras.

Mehta e Monteiro (2008) discutem a complexidade da microestrutura do concreto, considerando a não homogeneidade na distribuição da pasta de cimento e agregado. Isso porque, em algumas regiões, percebe-se que a pasta de cimento hidratada é tão densa quanto o agregado, ao mesmo tempo que em outras se apresenta de uma maneira altamente porosa. Ainda há que se considerar nas características da microestrutura a zona de transição na interface, que envolve as partículas de agregado graúdo, e embora seja composta pelos mesmos componentes que a pasta de cimento hidratada contém propriedades e microestrutura diferentes da matriz da pasta. Essa zona de transição acaba criando uma região mais frágil e cuja influência no comportamento mecânico do concreto é bem maior do que poderia se esperar devido à sua espessura.

Na pesquisa realizada por Junges (2016) foi identificada uma região mais dura e outra menos dura na superfície, considerando isso como resultados de uma macro escala e das propriedades do concreto a níveis estruturais, e foi detectado um comprimento de correlação do concreto na ordem de 5 cm. Junges (2016) também analisou as propriedades da argamassa e do agregado graúdo isoladamente a partir da micro indentação, e verificou que a pasta de cimento tem uma dureza maior que o agregado graúdo. Já a micro indentação do agregado graúdo mostra que temos duas resistências característica de agregado, uma mais resistente que a outra (JUNGES, 2016). Essa distribuição de regiões pode ser visualizada na figura 1, o mapeamento foi realizado com o ensaio de esclerometria de reflexão.

Figura 1– Distribuição espacial da dureza superficial do concreto.



Fonte: Junges (2016).

### 2.3 Ensaios não destrutivos

Os ensaios considerados não destrutivos são aqueles que não causam nenhum dano no elemento ensaiado ou deixam pequenos danos para serem reparados após o ensaio. Eles não provocam perda na capacidade resistente do elemento (EVANGELISTA, 2002). Machado (2005) também trata os métodos não destrutivos como bastante vantajosos, pois propiciam maior quantidade de ensaios e uma imediata disponibilidade dos resultados, com certa velocidade executiva e custo mais baixo em relação aos processos que necessitam da extração de amostras para então examiná-las.

De acordo com o Instituto Americano do Concreto – ACI 228. 1R (2003) uma grande característica desse procedimento é fato de não medirem diretamente a resistência à compressão do concreto em uma estrutura, entretanto se considera medidas de alguma outra propriedade para enfim se fazer a devida correlação. A determinação do valor da resistência do concreto endurecido ( $f_c$ ) utilizando ensaios não destrutivos é feita empregando curvas de correlação entre as grandezas obtidas nestes ensaios e a resistência à compressão do concreto (ESCOBAR; CRUZ; FABRO, 2011).

### 2.3.1 Ensaio de esclerometria de reflexão

A verificação se uma fôrma está preenchida com concreto pode ser feita utilizando um simples martelo, pois de acordo com o princípio do ricochete o retorno de uma massa elástica depende da dureza da superfície onde ela se choca (EVANGELISTA, 2002). A partir disso, Bauer (2000) afirma que foi baseado nesse método empírico, de determinar a dureza e a resistência do concreto pelo som e altura do martelo após o choque, que o engenheiro Ernest Schmidt desenvolveu o esclerômetro.

O ensaio esclerométrico é um método não destrutivo muito utilizado que fornece elementos para avaliação da qualidade do concreto endurecido, com ele se obtém o chamado índice esclerométrico (IE) . Segundo a NBR 7584 (ABNT, 2012) o IE é o valor que corresponde ao número de recuo do martelo após o impacto do esclerômetro de reflexão sobre a área ensaiada. O martelo de Schmidt ou martelo suíço está ilustrado na figura 2.

Figura 2– Esclerômetro de reflexão.



Fonte: Elaboração própria (2019).

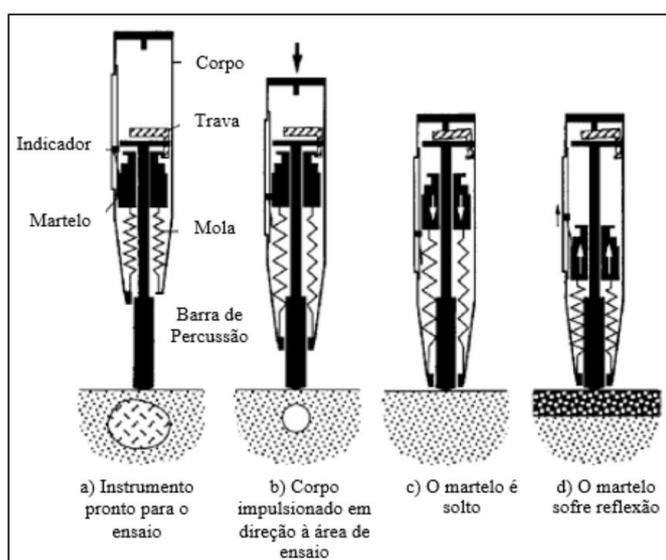
### 2.3.2 Método de ensaio

O Instituto Americano do Concreto – ACI 228. 1R (2003) afirma que para a realização do teste, a barra de percussão deve estar estendida e colocada em contato com a superfície a ser ensaiada, há um mecanismo de travamento para que a barra

fique estendida. Então, empurra-se essa barra em direção ao concreto, essa ação faz com que a mola impulsione o martelo a deslizar ao longo da barra, no momento que o limite é atingido a trava é liberada e o martelo desce impondo uma energia de impacto. A energia refletida volta com mesma intensidade, movimentando o martelo, até que seja medida no leitor a distância de rebote em escala numerada de 10 a 100.

A leitura da energia de impacto é denominada índice esclerométrico (IE) e possui unidade de medida adimensional (FONTANA, 2015). Com isso, pode-se obter uma estimativa da resistência à compressão do concreto. O funcionamento descrito pode ser visualizado na figura 3.

Figura 3 – Representação esquemática do ensaio de esclerometria.



Fonte: ACI 228.1R-03, 2003.

A NBR 7584 (2012) indica que deve ser feita aferição do esclerômetro a cada 300 impactos, utilizando uma bigorna especial de aço com uma massa de aproximadamente 16 kg e dotada de uma guia de aço. A figura 4 apresenta a bigorna.

Figura 4 – Bigorna de aferição do esclerômetro.



Fonte: Elaboração própria (2019).

### 2.3.3 Vantagens e Desvantagens

Evangelista (2002) e Castro (2009) citam como vantagem o fato de o ensaio ser realizado por um equipamento leve, de simples operação e baixo custo, proporcionando uma grande quantidade de dados de forma rápida e sem causar grandes danos à superfície ensaiada. O método é bom para avaliação da uniformidade do concreto, monitoramento do desenvolvimento da resistência ao longo do tempo, e também estimar a resistência do concreto (EVANGELISTA, 2002).

Entretanto, Castro (2009) e Evangelista (2002) ainda evidenciam que a principal limitação do método é a restrição de que os resultados são representativos apenas de uma camada superficial de concreto, o que pode não representar o interior do corpo ensaiado segundo o Instituto Americano do Concreto – ACI 228. 1R (2003). O Instituto também afirma que mesmo sendo um ensaio de simples execução há muitos parâmetros que interferem nos seus resultados e se mal interpretados podem conduzir a informações não condizentes com a realidade.

### **2.3.4 Aplicações**

Castro (2009) informa esse tipo de ensaio não destrutivo pode fornecer uma boa avaliação na fabricação de artefatos pré-moldados pelo motivo de poder detectar a uniformidade de uma estrutura, da mesma forma que possibilita o acompanhamento do ganho de resistência auxiliando na etapa de remoção do escoramento em uma obra, na colocação de uma estrutura em serviço e ainda pode prever a necessidade sobre a realização de um ensaio mais complexo.

### **2.3.5 Fatores Influentes**

Os principais fatores que têm influência sobre os resultados do ensaio esclerométrico são o tipo de cimento, tipo e dimensão do agregado, condições de umidade e estado da superfície, carbonatação, idade do concreto ensaiado e orientação do instrumento. Esses parâmetros serão explanados nos tópicos em sequência.

#### **2.3.5.1 Tipo de cimento**

Conforme Malhotra (2004 *apud* Samaniego 2014) concretos produzidos a partir de cimentos com alta alumina podem ter resistências 100% maiores do que concretos de cimento Portland comum. Assim como, no caso de concretos de cimento com alto teor de sulfato, a resistência obtida pode ser 50% menor do que a apresentada por cimento Portland comum.

#### **2.3.5.2 Tipo e dimensão do agregado**

Segundo a NBR 7584 (2012) diferentes tipos de agregados podem produzir concretos com a mesma resistência, entretanto com índices esclerométricos diferentes. Essa variação se torna mais acentuada quando se usa agregados leves e pesados. No estudo realizado por Yunt et al (1988) foram investigadas composições com agregados de diferentes diâmetros e se constatou que a correlação do ensaio

esclerométrico com a resistência à compressão é mais influenciada pelo teor do agregado graúdo do que pela sua dimensão máxima.

Conforme o Instituto Americano do Concreto – ACI 228. 1R (2003) o teste é sensível as condições no ponto exato de aplicação do ensaio, ou seja, se a barra do equipamento estiver posicionada sobre uma partícula de agregado duro o resultado para o IE será um valor anormalmente elevado. O mesmo princípio ocorre para locais onde o ponto ensaiado está localizado sobre uma armadura com baixo cobrimento. Contudo, no caso de haver um vazio, ou uma partícula de agregado macio, sob o local de rebote o IE apresentado será menor.

### **2.3.5.3 Umidade da superfície**

Superfícies úmidas podem provocar subestimativa da qualidade do concreto, o índice esclerométrico pode indicar valores de resistência até 20% inferiores àqueles indicados para o concreto seco equivalente (NBR 7584, 2012).

### **2.3.5.4 Textura da superfície**

O Instituto Americano do Concreto – ACI 228. 1R (2003) afirma que quando o teste for realizado sobre um concreto áspero ocorre um esmagamento local e a resistência obtida será menor do que o valor real, já uma superfície lisa e dura pode resultar em valores mais elevados do IE. As superfícies confinadas por fôrmas absorventes e lisas, verticais ou inclinadas, fornecem índices esclerométricos com boa correlação com a resistência do concreto (NBR 7584, 2012).

### **2.3.5.5 Carbonatação**

A NBR 7584 (ABNT, 2012) e o Instituto Americano do Concreto – ACI 228. 1R (2003) atentam para a interferência de carbonatação na superfície que promove uma superestimação da resistência, podendo superar os valores reais em 50%. Segundo a norma, para esses casos, deve-se definir coeficientes corretivos que minimizem o efeito da superfície carbonatada.

### **2.3.5.6 Idade do concreto**

De acordo com a NBR 7584 (ABNT, 2012) a idade do concreto influencia no resultado do ensaio devido às condições de cura e carbonatação da superfície, o que distorce as correlações com a resistência estabelecida para as condições normalizadas, na idade de 28 dias. Se a idade do ensaio for superior a 60 dias ou inferior a 14 dias, a norma indica que devem ser feitas novas correlações.

### **2.3.5.7 Orientação do instrumento**

O esclerômetro deve ser usado ortogonalmente à área do ensaio, mas a posição do esclerômetro em relação a vertical também tem influência sobre o valor do índice esclerométrico, devido à ação da gravidade (CASTRO, 2009). Caso o martelo não esteja na posição horizontal, Castro (2009) estabelece que deve ser feita uma correção do índice esclerométrico a partir de escalas presentes no aparelho, desde que seja sabido o ângulo com a horizontal da aplicação do ensaio.

### **2.3.6 Acurácia**

Malhotra (1984) indica que a resistência estimada possui uma acurácia de 15 a 20% contanto que os corpos de prova sejam moldados, curados e ensaiados em condições idênticas. Já Facaoaru (1984) propõe uma acurácia de 12 a 18% quando se tem disponíveis os corpos de prova e a composição do concreto, quando não se tem conhecimento do traço do concreto então se tem uma acurácia de 15 a 20%. O autor ainda cita que a acurácia pode ser de 18 a 28% quando se tem conhecimento do traço, mas não é possível a extração de testemunhos, ou ainda esse valor pode ser acima de 30% quando apenas dados auxiliares são conhecidos, desde que a idade do concreto seja menor que um ano.

### **2.3.6 Correlação entre o índice esclerométrico e a resistência a compressão**

A NBR 7584 (ABNT, 2012) ressalta que o aparelho fornece junto ao seu corpo um gráfico para correlacionar a resistência à compressão com os valores do IE encontrados pelo ensaio. Entretanto, deve-se atentar que esse ábaco apresenta

valores correspondentes a concretos preparados em outros países, com materiais e condições diferentes das brasileiras.

Diante disso, diferentes autores utilizando dados experimentais obtidos de estudos feitos no laboratório propuseram curvas que representam a correlação entre o índice esclerométrico (IE) e a resistência à compressão ( $f_c$ ) (SAMANIEGO, 2014). Algumas das equações propostas se encontram na tabela 2.

Tabela 2 – Equações propostas por diferentes autores para correlação do IE com  $f_c$ .

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

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

É importante salientar que, mesmo fornecendo uma boa medida da dureza superficial do concreto, o método esclerométrico não pode ser considerado substituto de outros métodos, mas um método adicional ou um ensaio complementar (NBR 7584, 2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados como componentes para as misturas apresentadas neste trabalho foram caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Unipampa campus Alegrete e foram selecionados conforme a disponibilidade na região.

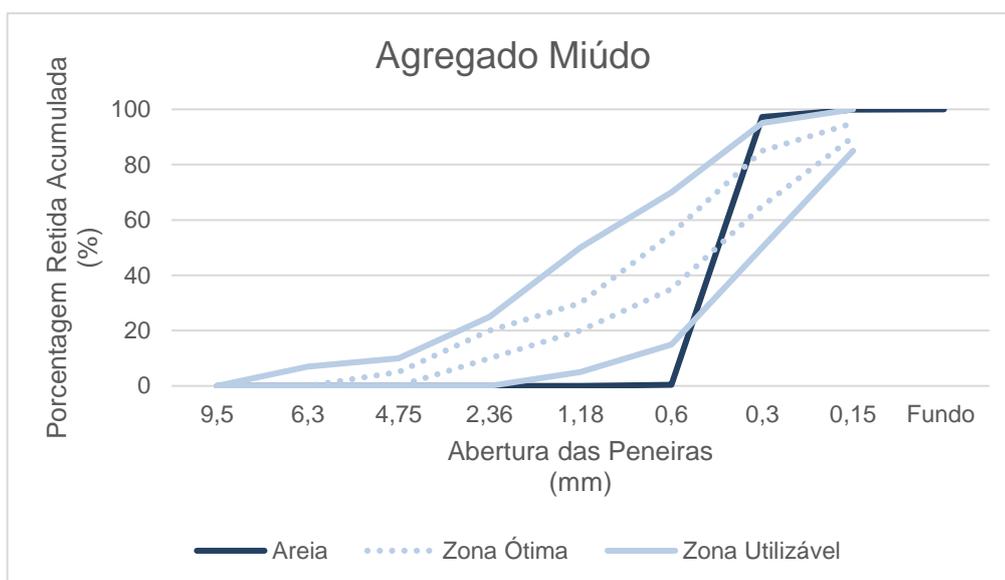
Como agregado miúdo foi utilizado a areia média fina e como agregados graúdos as britas comercializadas como 0 e 2. A composição granulométrica desses materiais foi realizada conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Na figura 5 pode ser feita a visualização do agregado miúdo empregado. Sua respectiva curva de distribuição granulométrica está mostrada na figura 6, a mesma representação se dá para os agregados graúdos na sequência. Na figura 7 está apresentado os dois agregados graúdos utilizados, brita 0 e brita 2, e nas figuras 8 e 9 suas respectivas curvas granulométricas. Os limites estabelecidos na composição granulométrica obedecem às especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 5 – Agregado miúdo.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 6 – Curva granulométrica agregado miúdo.



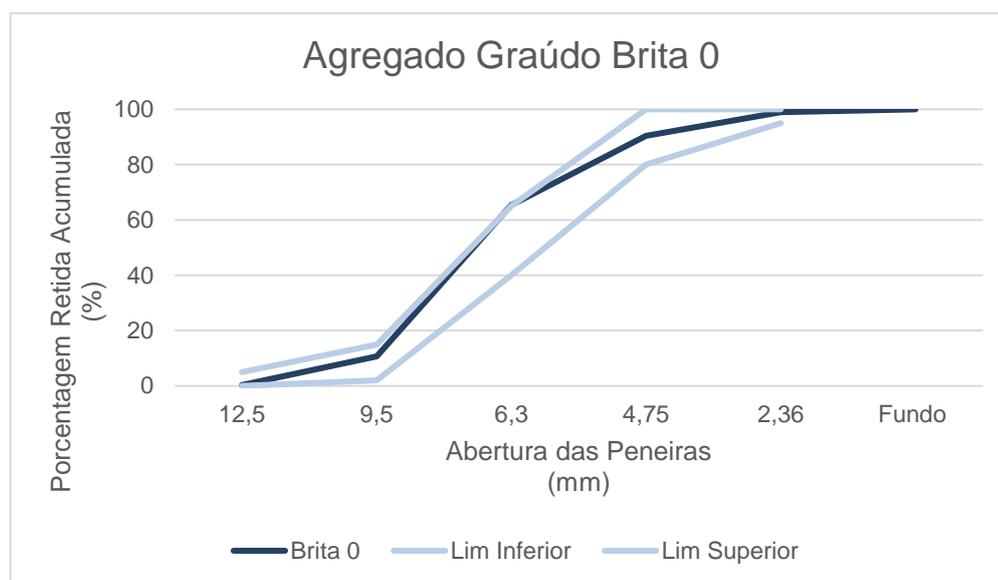
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 7 – Agregado graúdo.



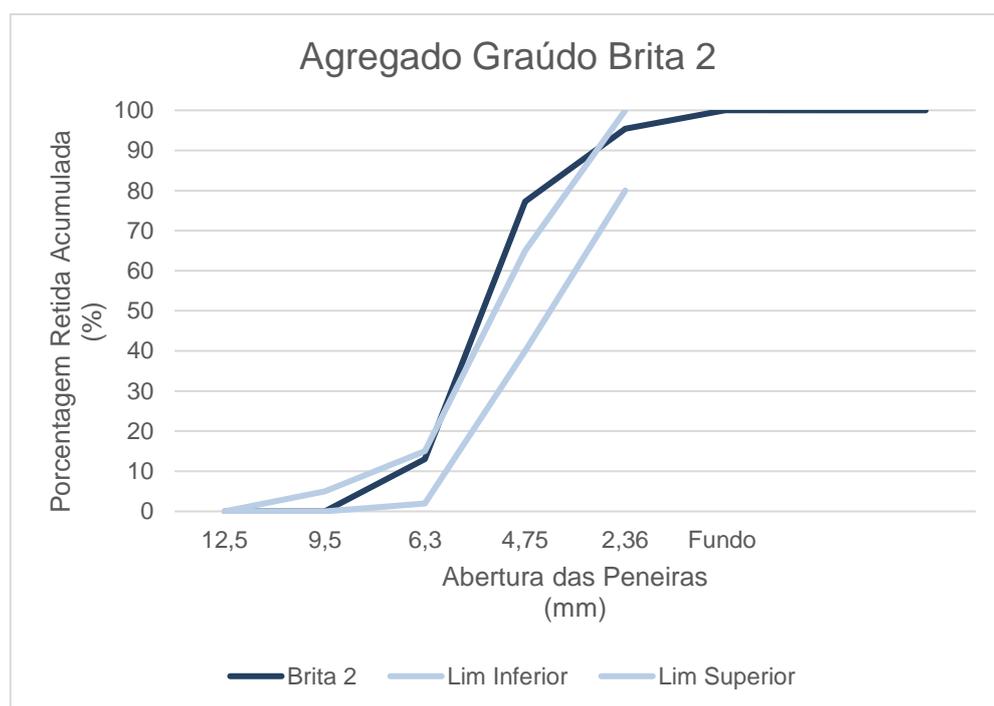
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 8 – Curva granulométrica - Brita 0.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 9 – Curva granulométrica - Brita 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir da composição granulométrica dos agregados, pode-se obter informações como o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado, que podem ser identificadas na tabela 3.

Tabela 3 – Módulo de finura e dimensão máxima característica dos agregados.

	<b>Módulo de Finura</b>	<b>Diâmetro Máx (mm)</b>
Areia	1,975	0,6
Brita 0	2,001	12,5
Brita 2	2,084	25

Fonte: Autoria própria (2019).

Seguindo os procedimentos descritos pela NBR 9776 (ABNT, 1987) foi determinada a massa específica do agregado miúdo utilizando o frasco de Chapman. No caso dos agregados graúdos, a NBR NM 53 (ABNT, 2009) especifica como se deve determinar a massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Esses valores estão descritos na tabela 4.

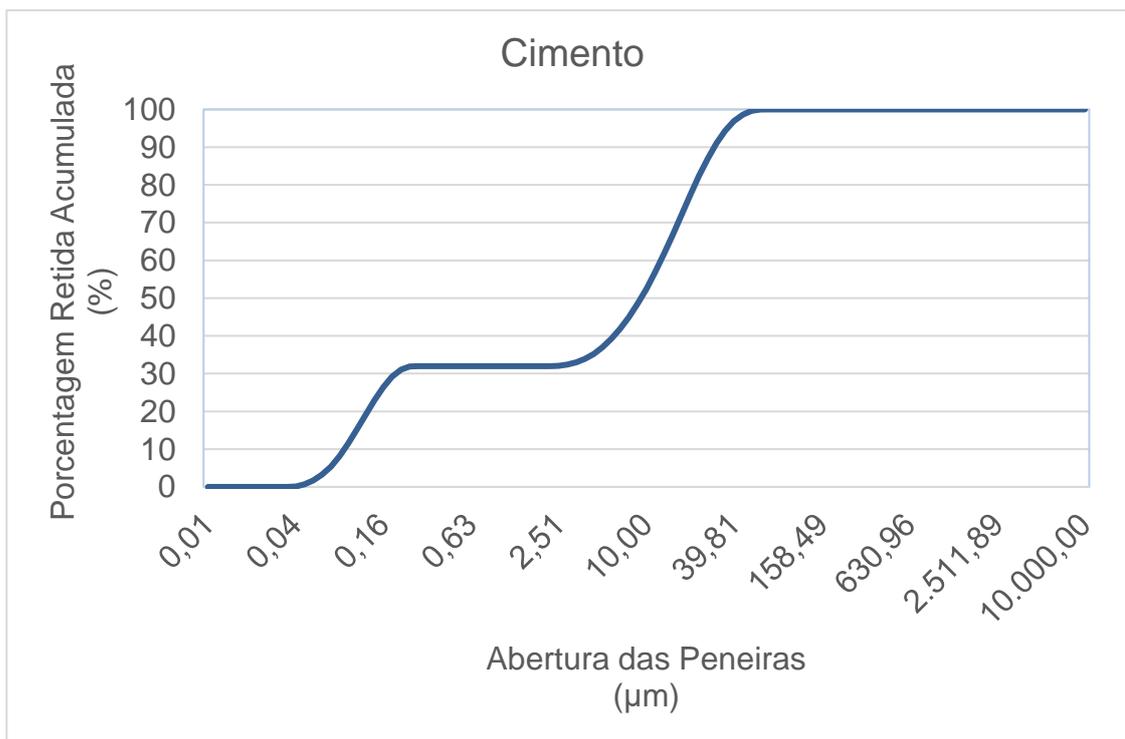
Tabela 4 – Massa específica dos agregados.

	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Areia	2,65
Brita 0	2,85
Brita 2	2,94

Fonte: Autoria própria (2019).

O cimento utilizado é o CP V-ARI de alta resistência inicial, sua granulometria foi determinada através da difração de raios laser pelo analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000. A curva da composição granulométrica pode ser visualizada na figura 10.

Figura 10 – Curva granulométrica cimento CP V - ARI.

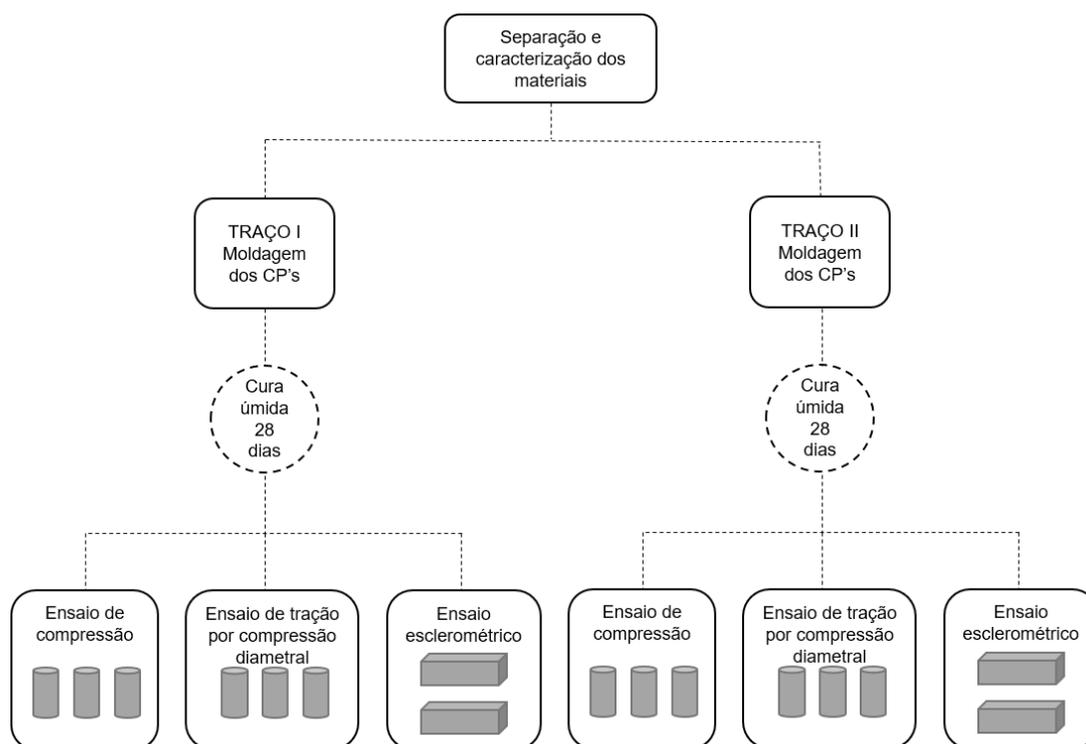


Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.2 Método

A Figura 12 apresenta o fluxograma representativo da metodologia dessa pesquisa. E em seguida, serão descritos os procedimentos realizados.

Figura 11 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autoria própria (2019).

Após a caracterização dos materiais, o concreto foi produzido seguindo o traço escolhido, informado na tabela 5, e foram realizadas duas concretagens, repetindo exatamente o mesmo traço, porém alterando o agregado graúdo. Sendo o traço I com o agregado brita 0 e o traço II ao agregado brita 2.

Tabela 5 – Traço utilizado na pesquisa.

TRAÇO	
Cimento	445,39 kg/m <sup>3</sup>
Areia	753,49 kg/m <sup>3</sup>
Brita 0 e 2	1028,87 kg/m <sup>3</sup>
Água	196,06 kg/m <sup>3</sup>
a/c	0,44 kg/m <sup>3</sup>
Teor de argamassa	42,3 %
Superplastificante	0,59 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Autoria própria (2019).

Com o concreto em estado fresco, determinou-se sua trabalhabilidade conforme o ensaio de abatimento do tronco de cone, seguindo a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Assim, obteve-se um abatimento de 5 cm e 11 cm para as misturas com brita 0 e brita 2, respectivamente. Essa diferença de abatimento pode ser visualizada na figura 11.

Figura 12 – Ensaio de abatimento do concreto com a) brita 0 e b) brita 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

Os corpos de prova (CP) foram moldados seguindo a NBR 5738 (2016). Foram concretados dois tipos de corpos de prova: cilíndricos, com dimensão correspondente à altura de 200 mm e diâmetro de 100 mm, e prismas com espessura de 100 mm e 400 mm de largura e comprimento.

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida durante 24h e ao fim desse período foi realizada a desforma. Os CP's ainda continuaram

sob cura úmida durante 28 dias. Na figura 13 podem ser visualizados os corpos de prova cilíndricos e os prismas ensaiados, respectivamente.

Figura 13 – Corpos de prova a) Cilíndrico e b) Prisma.



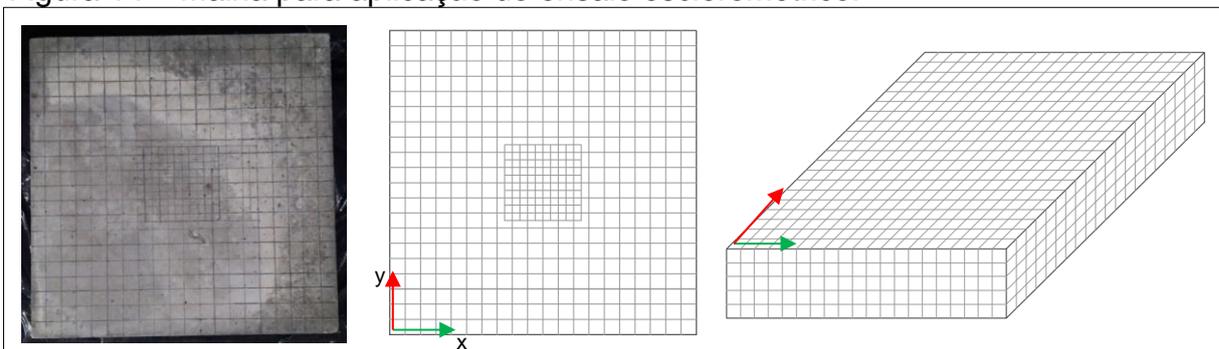
a) Cilíndrico

b) Prisma

Fonte: Autoria própria (2019).

Ao atingir a idade de 28 dias, os corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios de ruptura por compressão e tração por compressão diametral, realizados com a prensa universal para ensaios mecânicos, seguindo a NBR 5739 (2007). O ensaio esclerométrico pelo martelo de Schmidt foi realizado nos prismas de concreto, para isso, na face ensaiada foi demarcada uma malha para aplicação do ressalto a cada 20 mm. Nas faces de maior área, foi delimitada uma região central de 100x100 mm onde os pontos foram demarcados a cada 10 mm, a fim de se obter dados mais precisos, o que pode ser visualizado na figura 14.

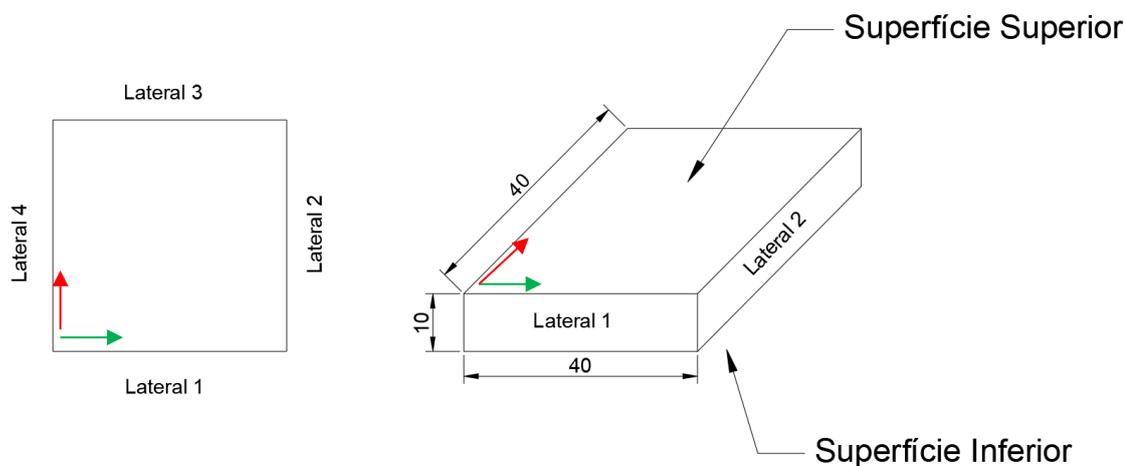
Figura 14 – Malha para aplicação do ensaio esclerométrico.



Fonte: Autoria própria (2019).

As faces foram determinadas como inferior sendo a face referente à confinada pela forma e superior referente a face livre. O esquema de nomenclatura pode ser observado na figura 15.

Figura 15 – Esquema de nomenclatura dos prismas.



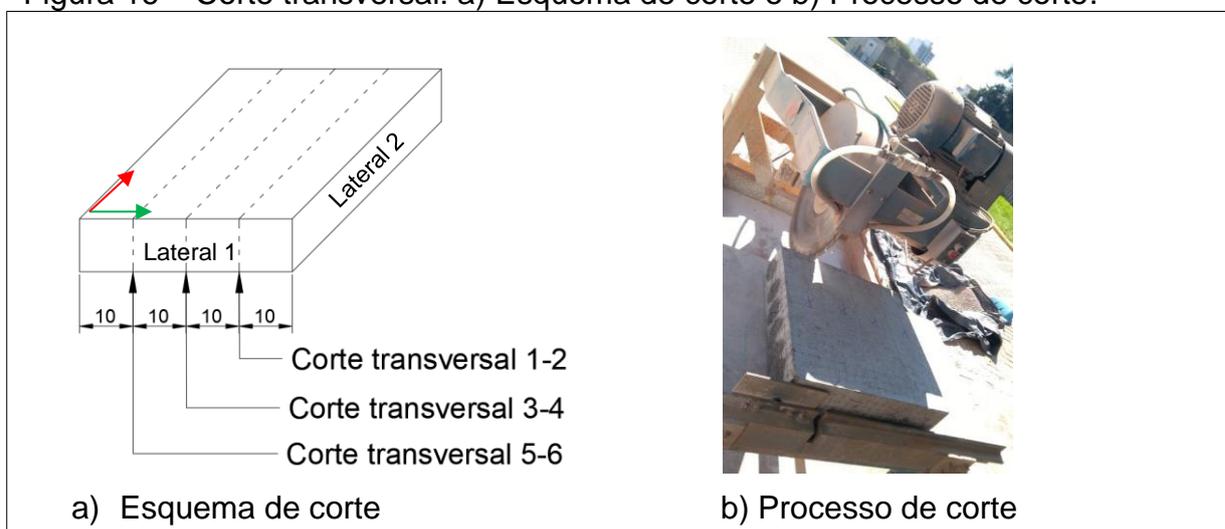
Fonte: Autoria própria (2019).

As faces livres necessitaram passar por uma regularização da superfície para que o ensaio fosse executado, já que a textura superficial influencia nos resultados. Essa regularização foi feita com auxílio da lixa que acompanha o instrumento.

Após realizado o ensaio nas faces superior e inferior, um corpo de prova de cada traço foi ensaiado nas laterais e submetidos à cortes transversais a cada 100mm. O objetivo dessa etapa é ensaiar o interior do corpo de prova e verificar se o exterior

e interior são representativos igualmente. Na figura 16 está representado o esquema e o processo de corte realizado com uma serra diamantada.

Figura 16 – Corte transversal: a) Esquema de corte e b) Processo de corte.



Fonte: Autoria própria (2019).

## 4 RESULTADOS

A seguir, na tabela 6 está apresentado os valores de tensão obtidos nos ensaios de rompimento dos corpos de prova.

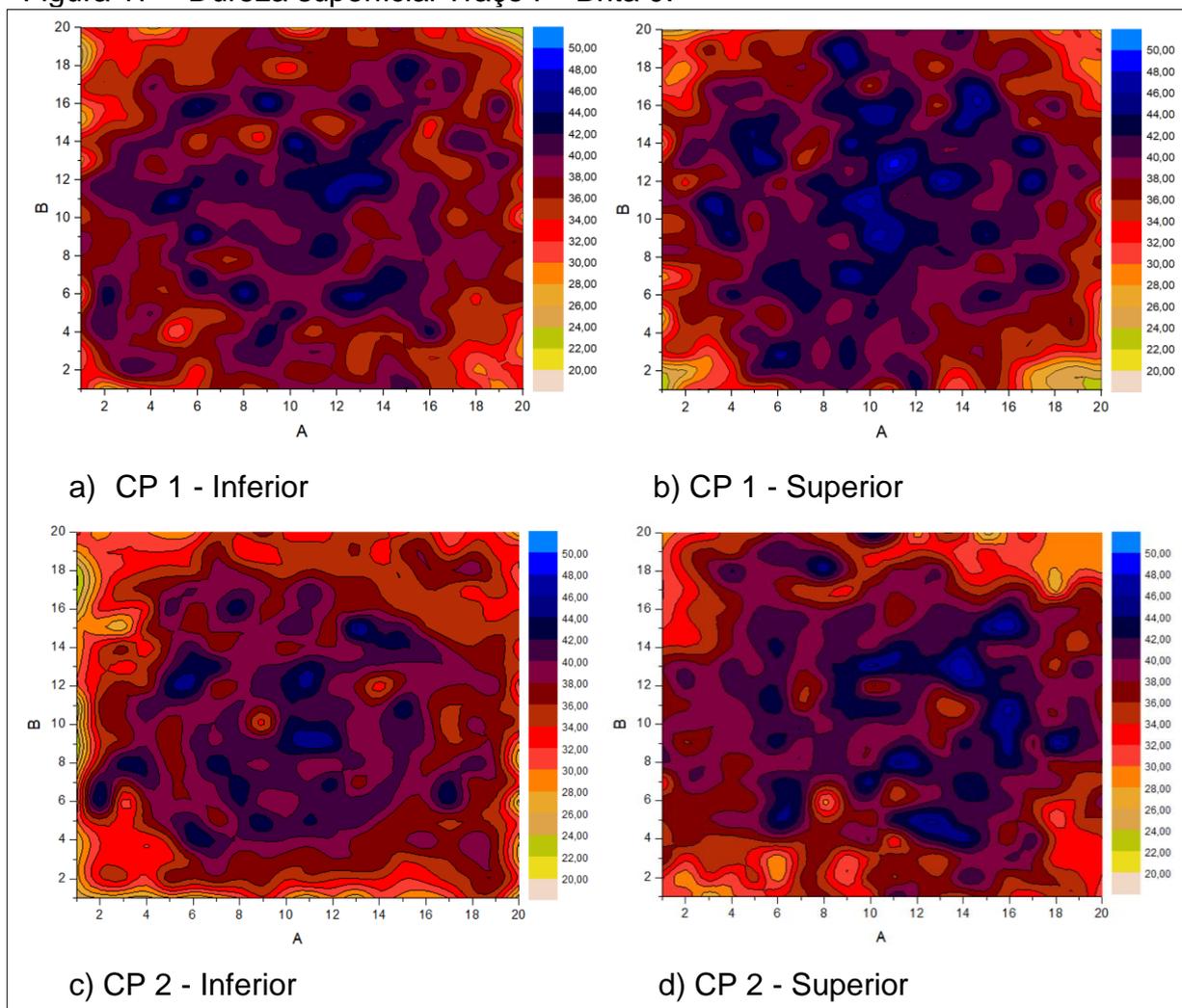
Tabela 6 – Resultados dos ensaios à tração por compressão diametral e compressão.

		Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
Traço I	CP 1	5,34	48,29
	CP 2	4,01	42,63
	CP 3	4,65	46,39
	Média	4,67	45,77
Traço II	CP 1	3,05	38,78
	CP 2	4,35	48,39
	CP 3	4,95	42,57
	Média	4,12	43,25

Fonte: Autoria própria (2019).

Com os resultados dos índices esclerométricos do traço I para os dois corpos de prova foram gerados gráficos de contorno para as superfícies, na figura 17 estão apresentados os respectivos gráficos.

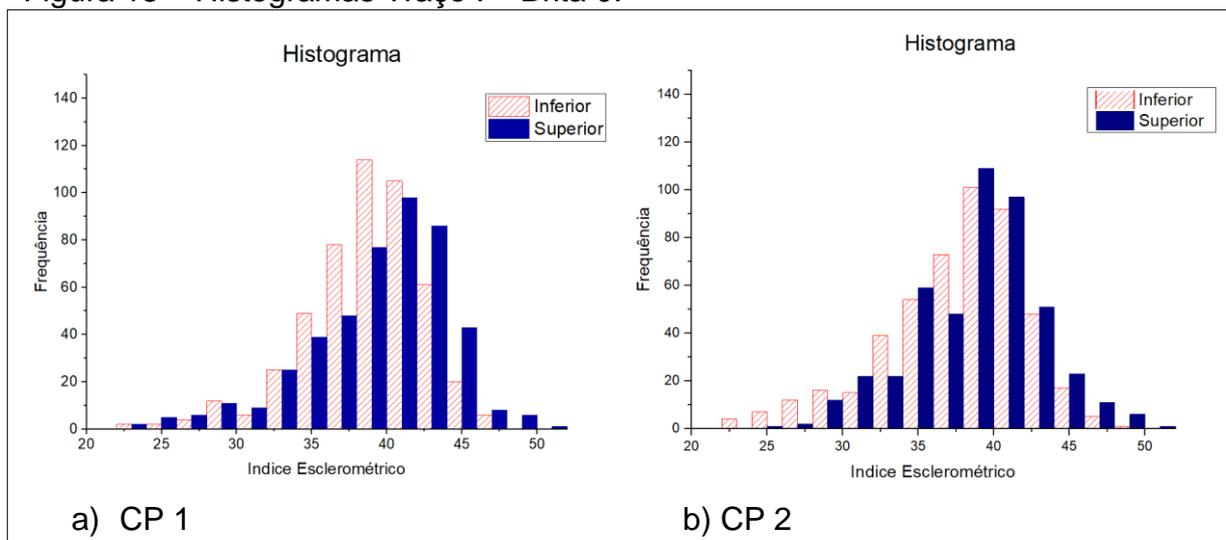
Figura 17 – Dureza superficial Traço I – Brita 0.



Fonte: Autoria própria (2019).

Com os dados coletados de IEs foram gerados histogramas a fim de representar a frequência dos dados obtidos em cada superfície, os histogramas dos corpos de provas referentes ao traço I se encontram na Figura 18.

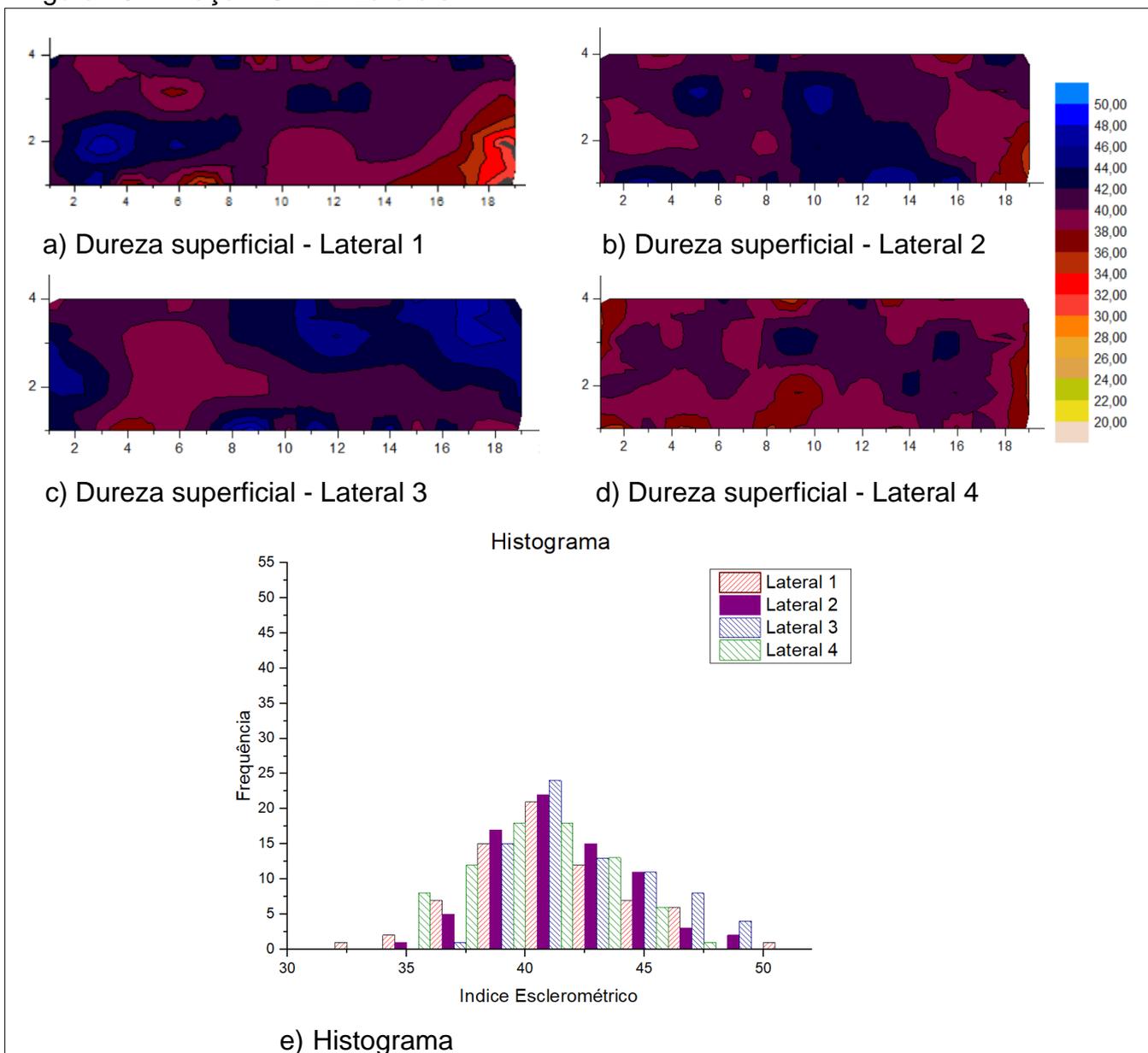
Figura 18 – Histogramas Traço I – Brita 0.



Fonte: Autoria própria (2019).

O segundo prisma do traço I foi ensaiado em todas suas laterais e também seu interior por meio de cortes transversais. Os gráficos de superfície das laterais do corpo de prova se encontram na figura 19, assim como os histogramas referentes.

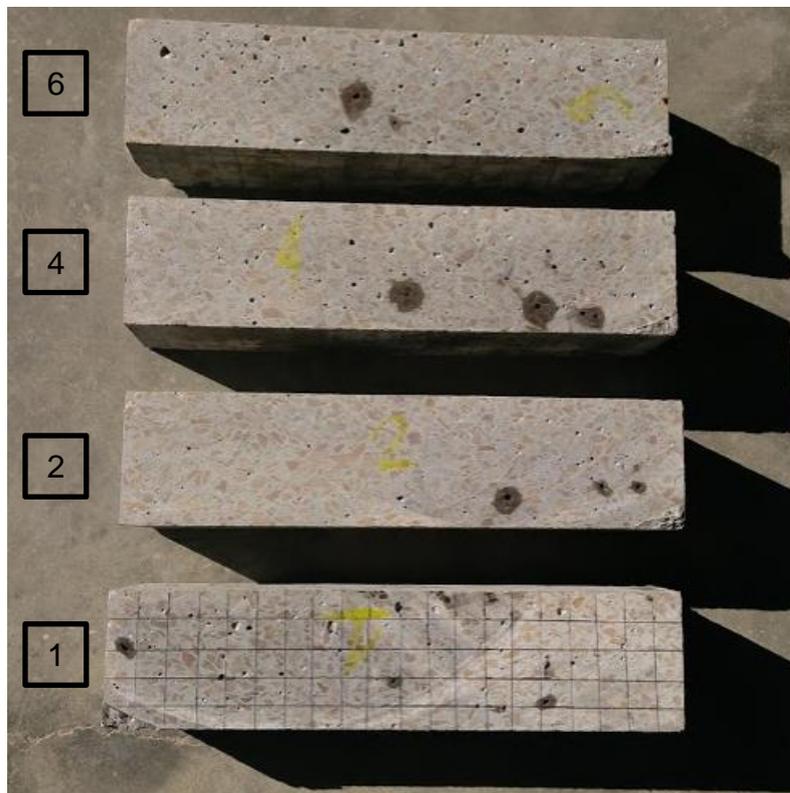
Figura 19 – Traço I: CP 2 - Laterais.



Fonte: Autoria própria (2019).

Ainda nesse mesmo corpo de prova foram feitos os cortes transversais, a Figura 20 apresenta o interior do concreto, com as indicações das laterais.

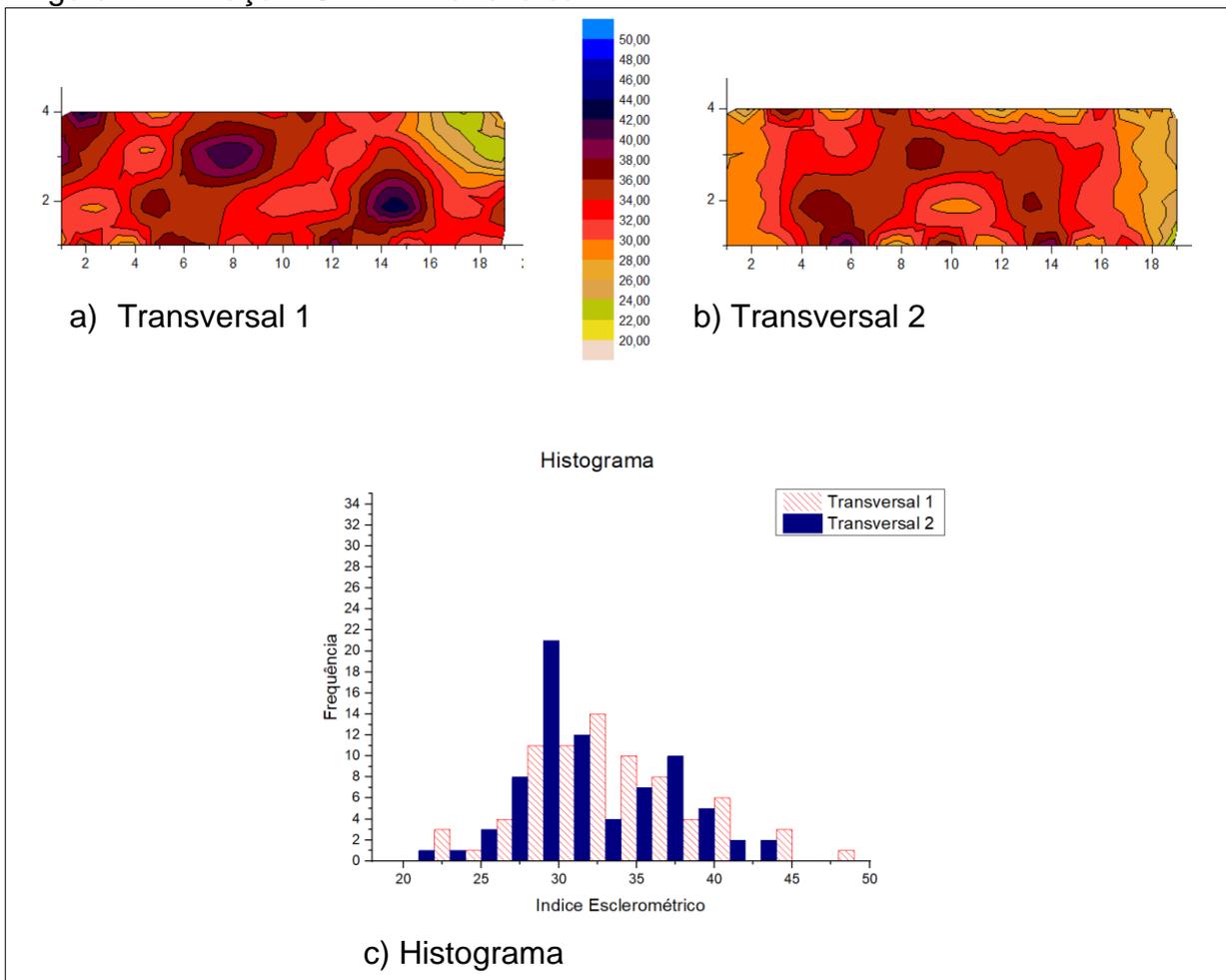
Figura 20 – Traço I: CP 2 - Transversais.



Fonte: Autoria própria (2019).

Os gráficos de superfície e histogramas para as seções transversais coincidentes se encontram nas figuras a seguir, sendo a figura 21 referente à seção 1-2.

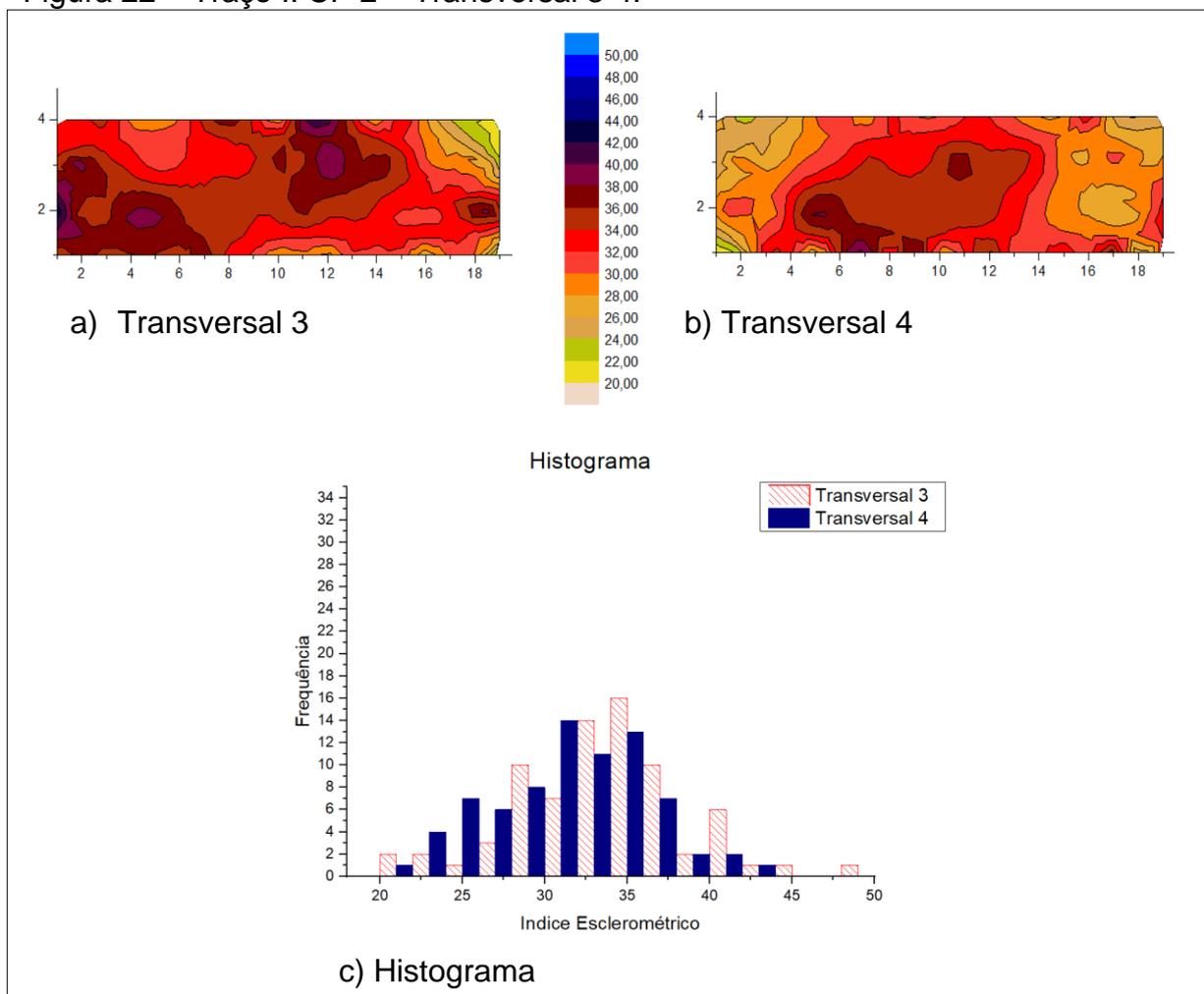
Figura 21 – Traço I: CP 2 – Transversal 1-2.



Fonte: Autoria própria (2019).

A figura 22 se refere às transversais 3 e 4.

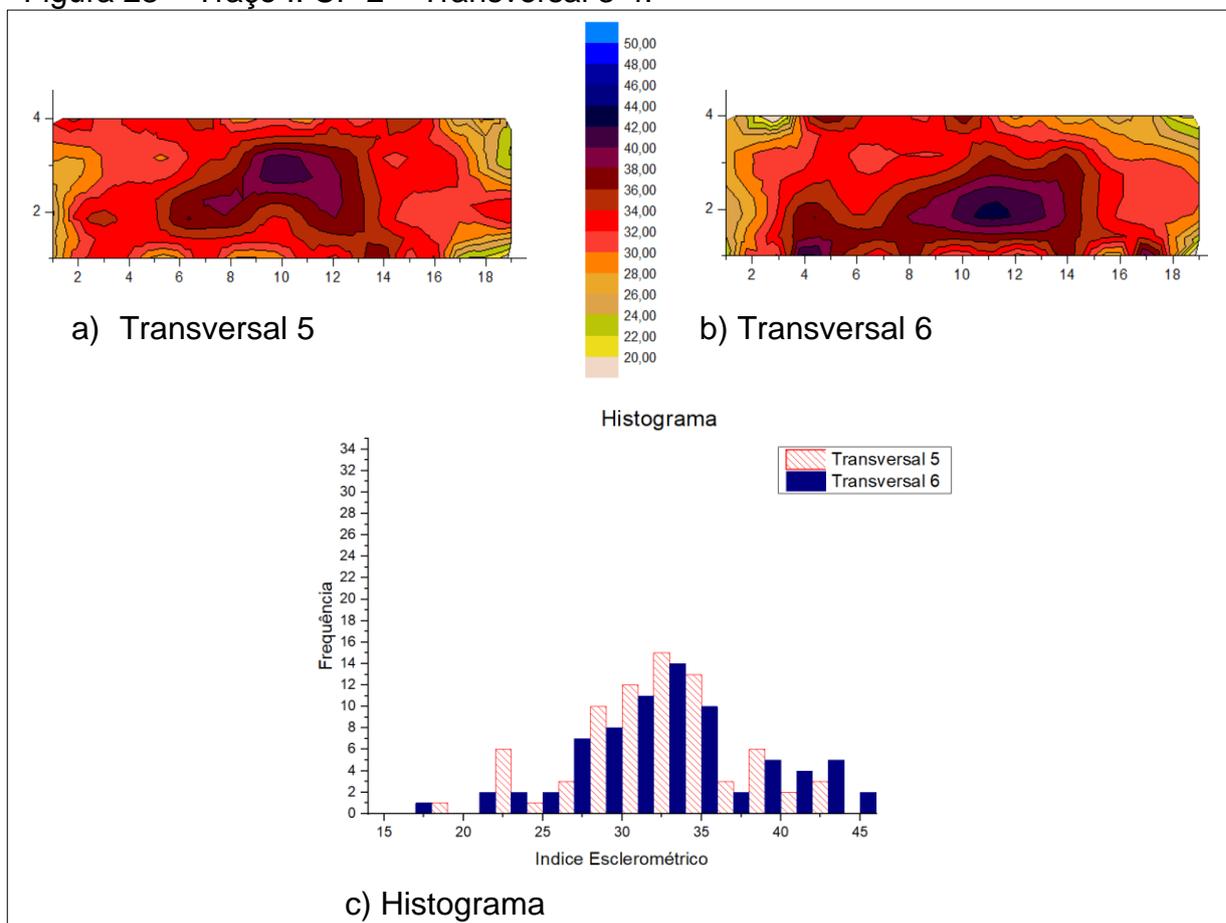
Figura 22 – Traço I: CP 2 – Transversal 3-4.



Fonte: Autoria própria (2019).

A figura 23 se refere às transversais 5 e 6.

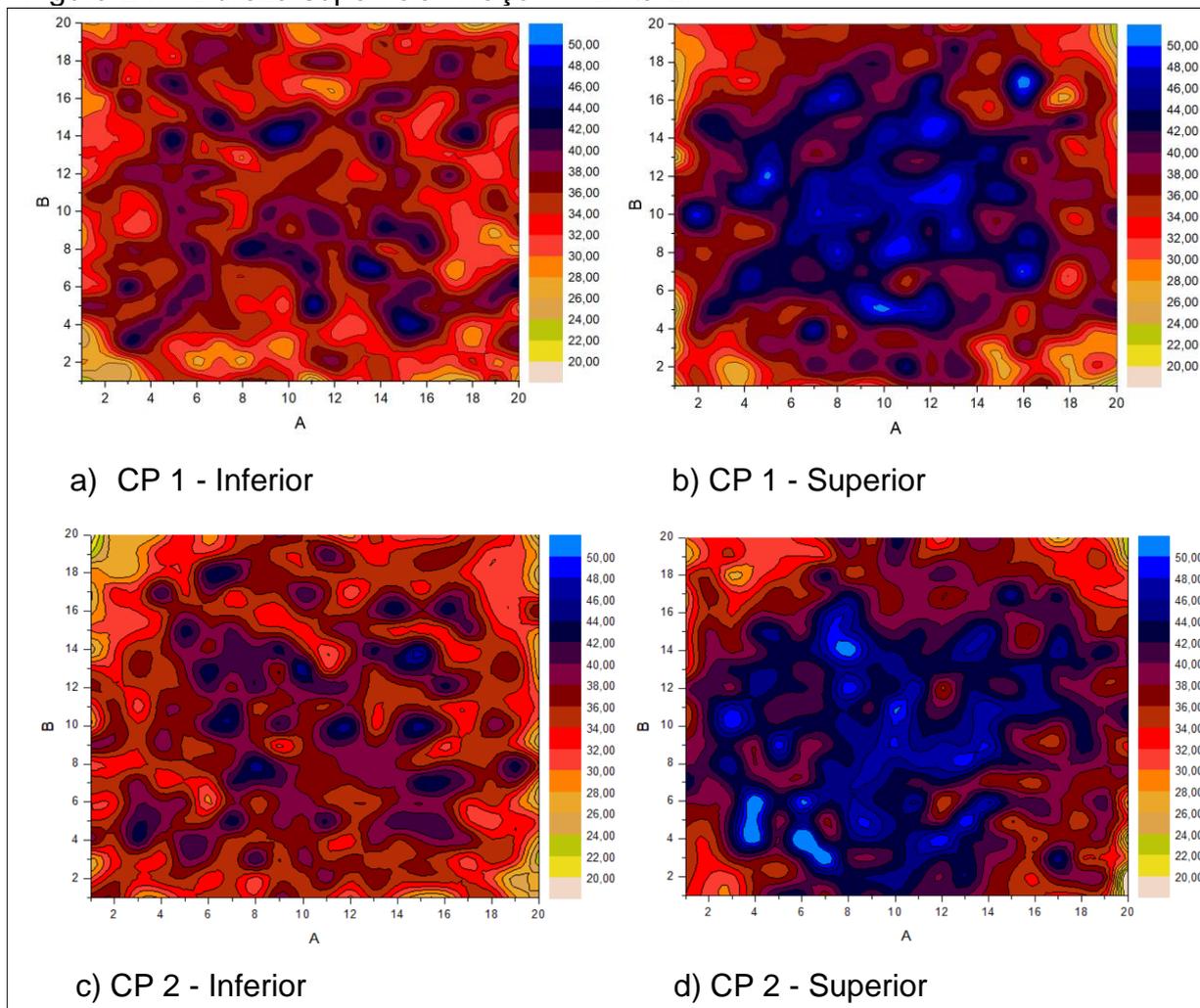
Figura 23 – Traço I: CP 2 – Transversal 3-4.



Fonte: Autoria própria (2019).

Os resultados do ensaio esclerométrico dos corpos de prova referentes ao traço II contendo a brita 2 serão apresentados em sequência, a figura 24 contém os gráficos de superfície das faces inferior e superior dos corpos de prova.

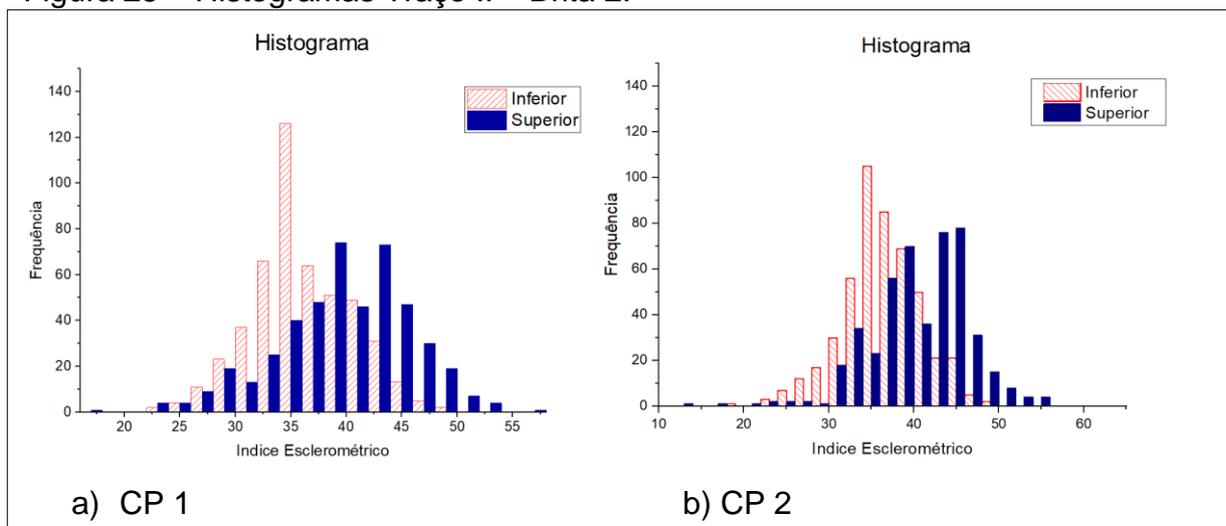
Figura 24 – Dureza superficial Traço II – Brita 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

Os gráficos representativos das frequências dos índices esclerométricos em cada superfície, nos dois CPs, estão apresentados na figura 25.

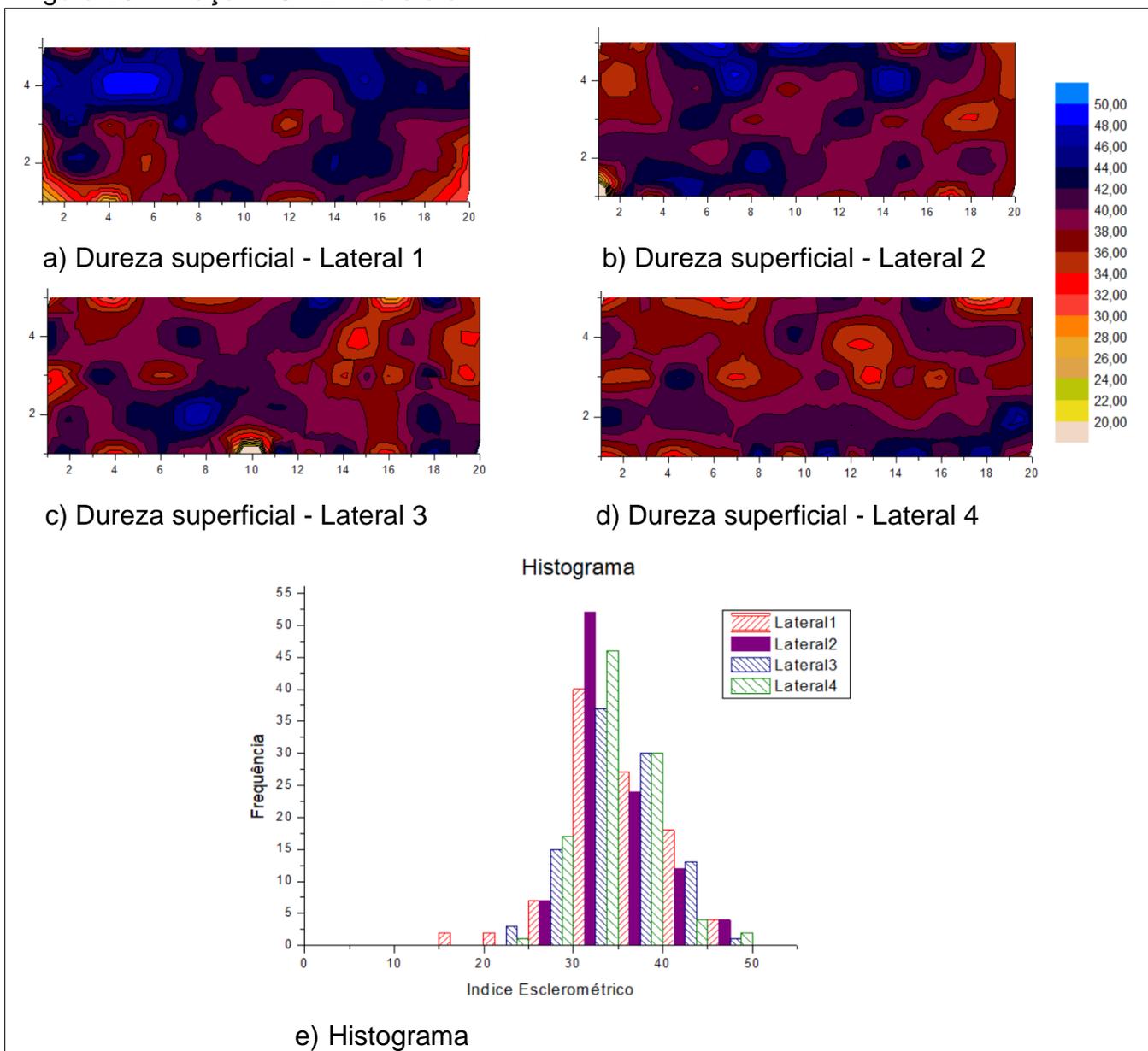
Figura 25 – Histogramas Traço II – Brita 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

Assim como no traço anterior, o segundo prisma do traço II foi ensaiado em todas suas laterais e também seu interior por meio de cortes transversais. Na figura 26 encontram-se os gráficos de superfície e histogramas das faces laterais externas.

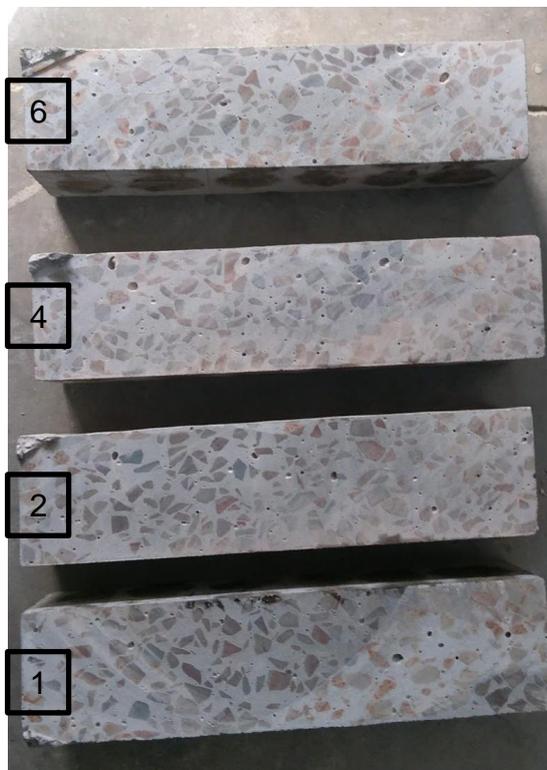
Figura 26 – Traço II: CP 2 - Laterais.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na figura 27 constam as seções transversais onde pode ser feita a visualização do interior do corpo de prova.

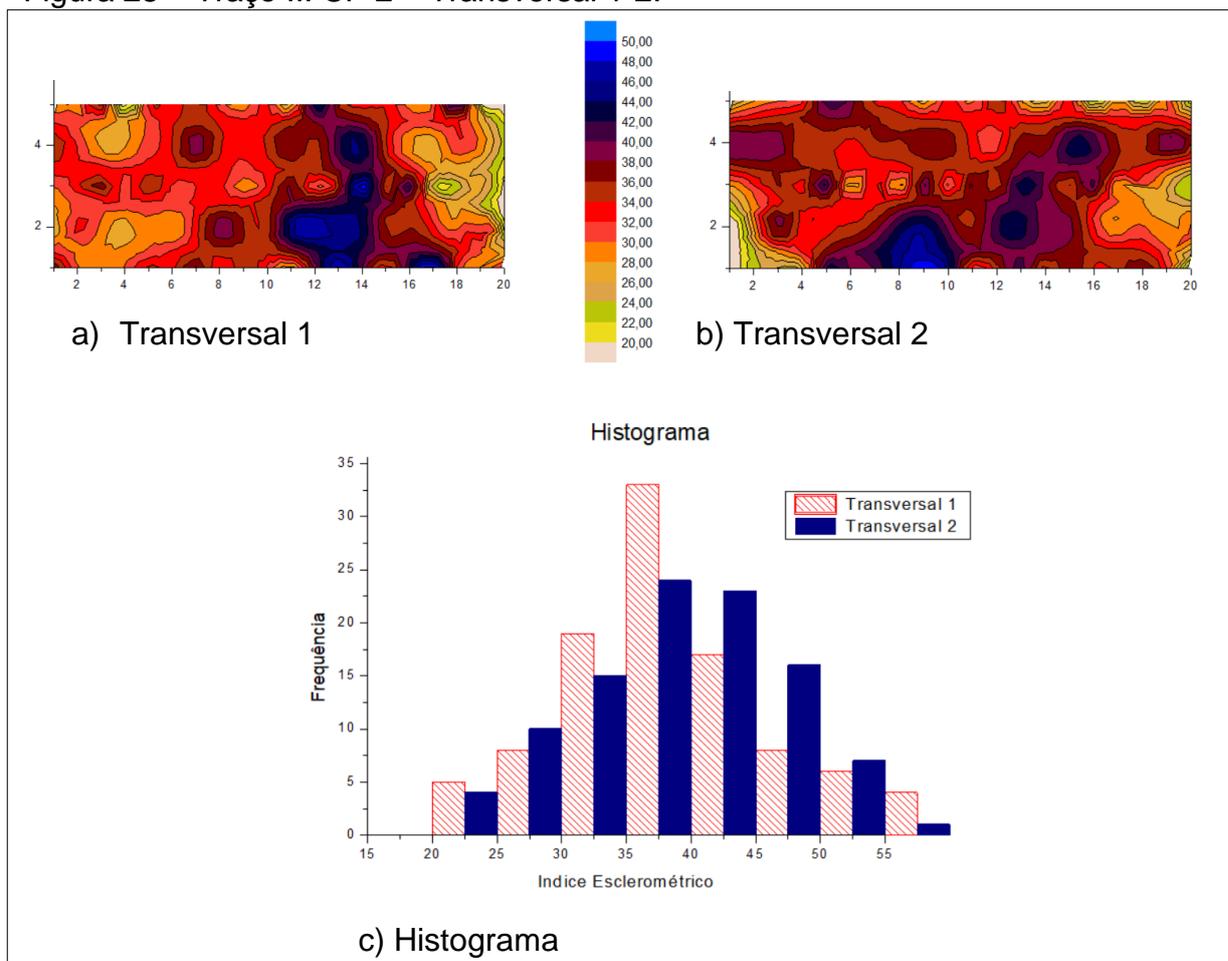
Figura 27 – Traço II: CP 2 - Transversais.



Fonte: Autoria própria (2019).

Os gráficos de superfície e histogramas para as seções transversais coincidentes se encontram na sequência, sendo a figura 28 referente à seção 1-2.

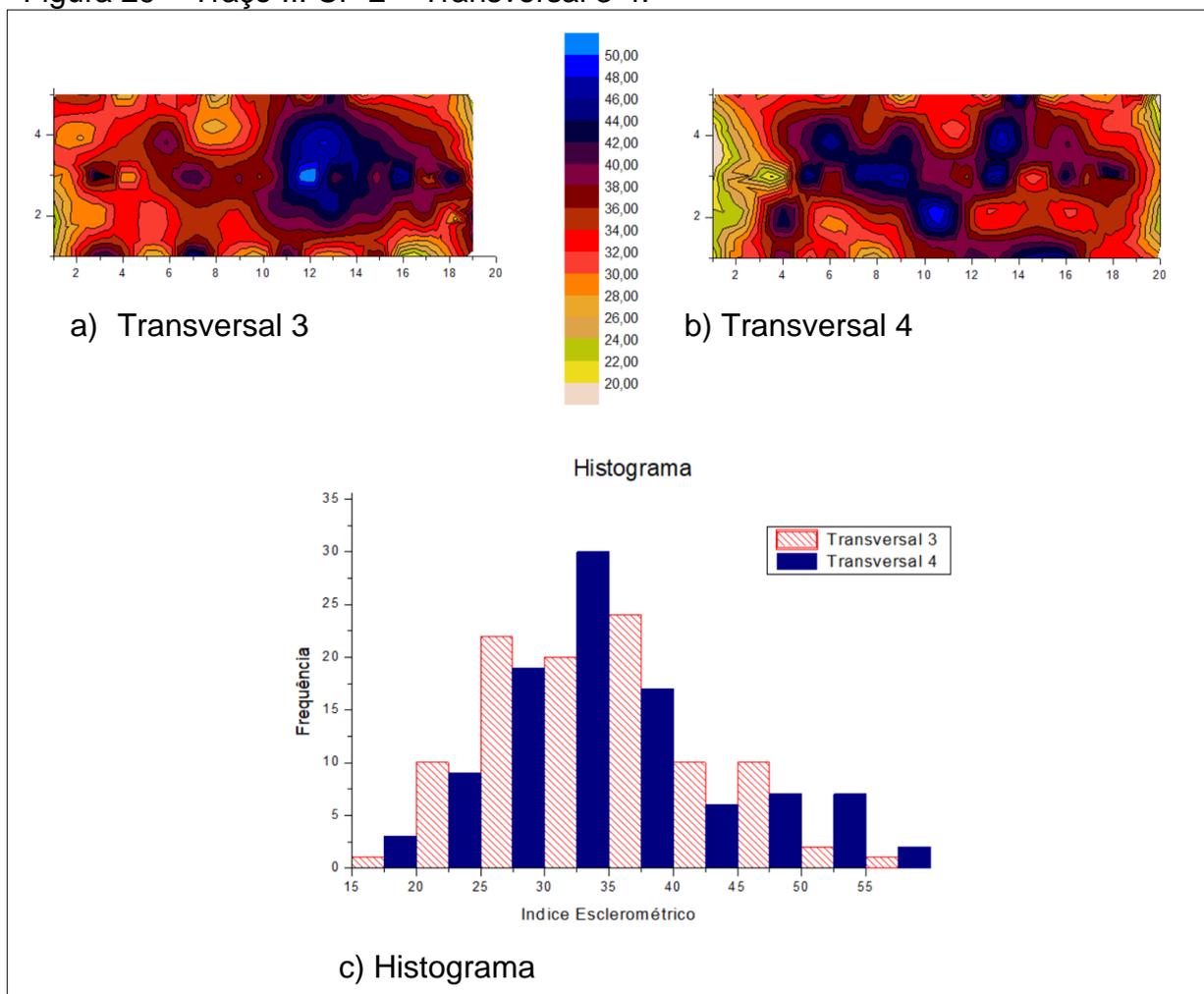
Figura 28 – Traço II: CP 2 – Transversal 1-2.



Fonte: Autoria própria (2019).

A figura 29 se refere às transversais 3 e 4.

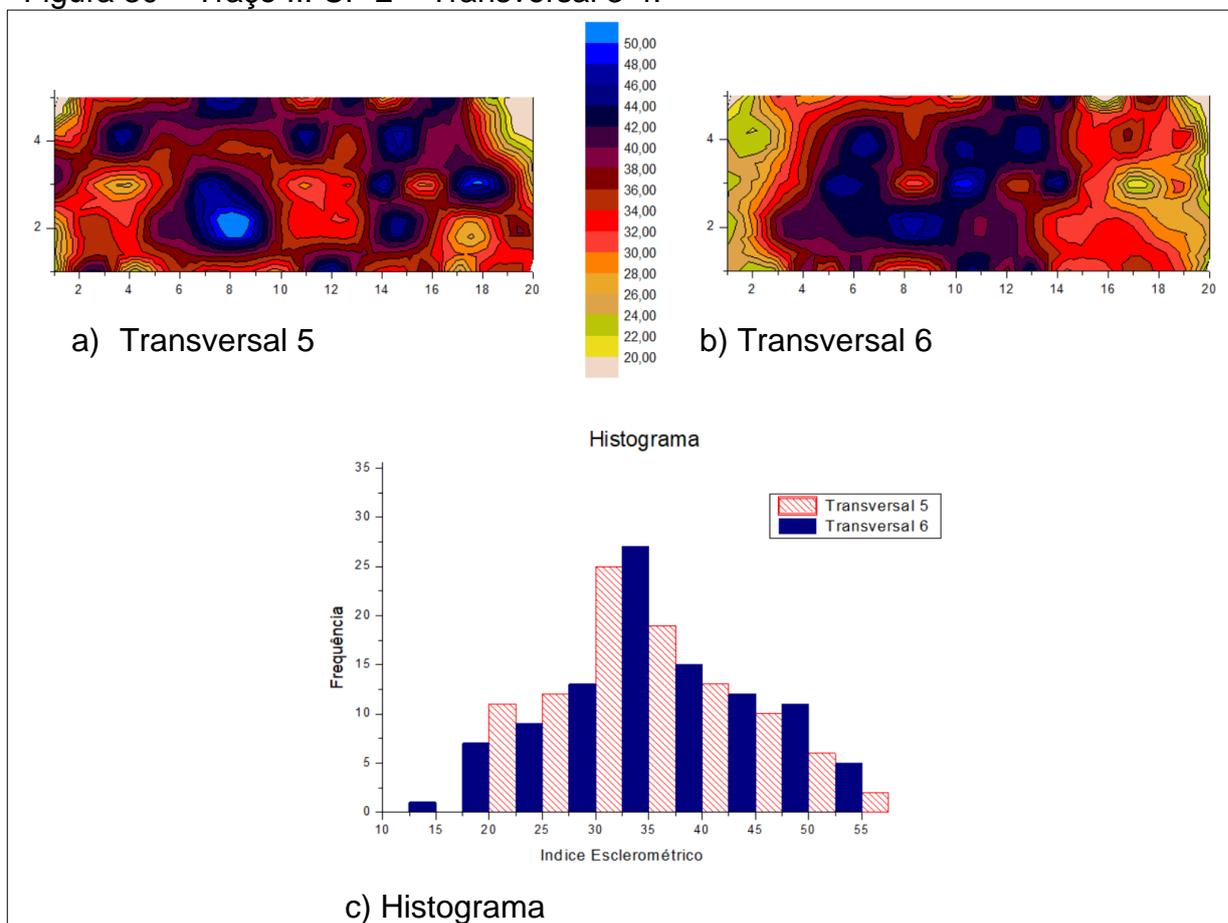
Figura 29 – Traço II: CP 2 – Transversal 3-4.



Fonte: Autoria própria (2019).

A figura 30 se refere às transversais 5 e 6.

Figura 30 – Traço II: CP 2 – Transversal 3-4.



Fonte: Autoria própria (2019).

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme mencionado na seção 2.3.6, estudos anteriores desenvolveram equações que permitem correlacionar os IEs obtidos no ensaio não destrutivo com a resistência à compressão atingida no rompimento dos corpos de prova. Na presente pesquisa foi utilizada a curva ajustada por Machado (2005), pois dentre as equações apresentadas na Tabela 2, é a que condiz com os materiais e condições utilizados no concreto de estudo. Os valores médios de dureza superficial, desvio padrão, correlação com  $f_c$  e coeficiente de variação constam na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise de dados - Traço I.

	IEmédio	Desvio Padrão	Resistência à Compressão	Coeficiente de Variação
Prisma I				
Inferior	38	3,93	43,9 MPa	10,4%
Superior	39	4,72	45,5 MPa	12,2%
Prisma II				
Inferior	37	4,67	41,5 MPa	12,6%
Superior	38	4,31	44,2 MPa	11,3%
Lateral 1	41	3,3	50,5 MPa	8,1%
Lateral 2	41	2,9	51,5 MPa	7,2%
Lateral 3	42	3,0	54,0 MPa	7,2%
Lateral 4	39	3,1	47,7 MPa	7,8%
Transversal 1	33	5,1	33,1 MPa	15,5%
Transversal 2	31	4,8	29,7 MPa	15,5%
Transversal 3	33	5,4	33,0 MPa	16,3%
Transversal 4	31	4,4	28,8 MPa	14,2%
Transversal 5	32	5,1	30,7 MPa	16,0%
Transversal 6	32	5,9	31,3 MPa	18,3%

Fonte: Autoria própria (2019).

Para uma melhor análise dos dados, foi definido o desvio padrão e resistência à compressão média para um grupo maior. Os dados das superfícies inferiores e superiores foram agrupados para que se pudesse verificar se realmente há uma divergência significativa entre uma superfície e outra. Na tabela 8 estão especificados o desvio padrão e resistência média em cada grupo de faces, a resistência média mais e menos o desvio padrão define o limite para o qual os valores de resistência da tabela anterior se tornam divergentes entre uma face e outra.

Tabela 8 – Variação dos dados - Traço I.

Grupo	DV	Resistência média	Xméd - DV	Xméd + DV
CP 1 - Superfícies	4,3	45,3 MPa	40,9 MPa	49,6 MPa
CP 2 - Superfícies	4,5	44,1 MPa	39,5 MPa	48,6 MPa
CP 2 - Laterais	3,2	51,0 MPa	47,8 MPa	54,2 MPa
CP 2 - Transversais	5,2	31,0 MPa	25,8 MPa	36,2 MPa

Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando a margem de variação estabelecida, pode-se constatar que as resistências médias a compressão encontradas em cada face na tabela 7, embora apresentem valores diferentes, não há uma variação tão significativa. Os valores de resistência de cada face se encontram dentro da faixa aceitável de divergência.

A tabela 9, assim como a tabela 7, apresenta os valores médios de dureza superficial, desvio padrão, correlação com  $f_c$  e coeficiente de variação referentes aos dados obtidos nos corpos de prova do traço II.

Tabela 9 – Análise de dados - Traço II.

	IE médio	Desvio Padrão	Resistência à Compressão	Coeficiente de Variação
Prisma I				
Inferior	35	4,51	37,8 MPa	12,8%
Superior	39	6,05	46,6 MPa	15,5%
Prisma II				
Inferior	36	4,61	38,4 MPa	13,0%
Superior	40	5,74	49,3 MPa	14,3%
Lateral 1	40	5,6	49,3 MPa	13,8%
Lateral 2	40	6,1	47,8 MPa	15,4%
Lateral 3	38	6,2	45,2 MPa	16,1%
Lateral 4	39	4,5	45,3 MPa	11,8%
Transversal 1	33	8,0	33,4 MPa	24,0%
Transversal 2	34	8,0	34,6 MPa	23,8%
Transversal 3	34	8,2	35,2 MPa	24,1%
Transversal 4	34	8,9	35,6 MPa	26,1%
Transversal 5	35	10,0	37,7 MPa	28,3%
Transversal 6	34	9,2	34,5 MPa	27,3%

Fonte: Autoria própria (2019).

Na tabela 10 estão apresentados os limites de variação aceitáveis para a resistência à compressão.

Tabela 10 – Variação dos dados - Traço II.

Grupo	DV	Resistência média	X <sub>méd</sub> - DV	X <sub>méd</sub> + DV
CP 1 - Superfícies	6,1	41,7 MPa	35,6 MPa	47,9 MPa
CP 2 - Superfícies	5,7	44,1 MPa	38,4 MPa	49,7 MPa
CP 2 - Laterais	5,7	46,9 MPa	41,2 MPa	52,5 MPa
CP 2 - Transversais	8,7	33,0 MPa	24,3 MPa	41,8 MPa

Fonte: Autoria própria (2019).

A partir da tabela anterior, pode-se perceber que mesmo que o traço apresente uma variação maior nos dados, o que se torna perceptível pelo coeficiente de variação, não são significativamente discrepantes entre uma face ou seção e outra.

Analisando os valores obtidos para o traço I, o qual possui agregado graúdo com menor granulometria, verifica-se que a resistência a compressão obtida pela correlação nas superfícies é semelhante ao valor médio obtido no ensaio de compressão axial: 45,77MPa. O mesmo não ocorre de forma tão significativa para o traço II, em que a resistência à compressão média alcançada no ensaio destrutivo é de 43,25MPa.

Com base nas tabelas 7 e 9 também é perceptível a variação nos resultados, o traço I apresenta valores de desvio padrão significativamente menores que o traço II. As seções transversais foram as que apresentaram maior dispersão entre os resultados, isso se explica pelo fato de não haver a camada de argamassa superficial nessas regiões, ao contrário das faces externas, que acaba tornando mais uniforme a superfície.

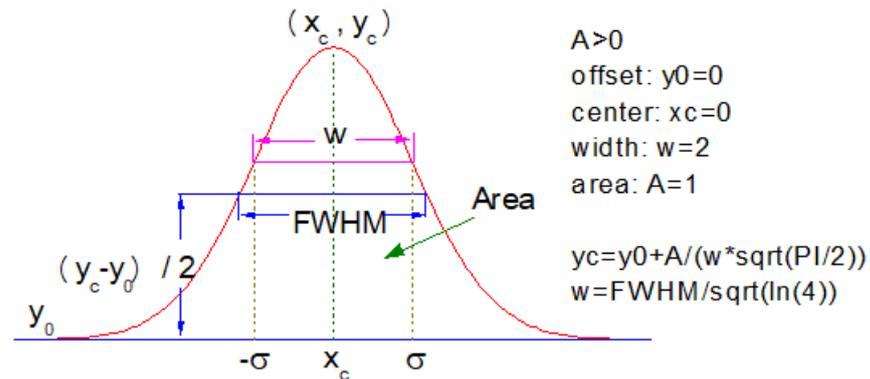
A partir dos dados de frequência emitidos, foi realizada uma aproximação da distribuição de frequências utilizando a curva de distribuição normal ou gaussiana. A seguir, está apresentada a Equação 1 utilizada pelo software OriginLab no método de aproximação de dados citado.

Equação 1

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-2\frac{(x-x_c)^2}{w^2}}$$

Onde  $x_c$  representa a média dos IEs,  $w$  o desvio padrão,  $y_0$  o valor mínimo e  $A$  a área do gráfico. Os parâmetros considerados na equação seguem em forma representativa na figura 31.

Figura 31 – Parâmetros considerados na distribuição de Gauss.



Fonte: OriginLab (2019).

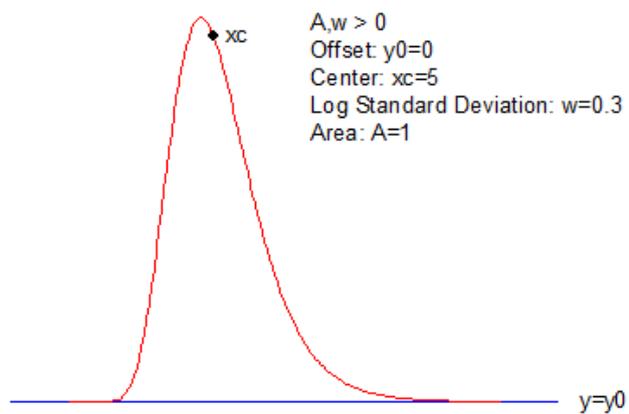
Analisando ainda o comportamento das frequências dos índices de dureza superficial obtidos, utilizou-se também a distribuição LogNormal, a qual é descrita pela Equação 2.

Equação 2

$$y = y_0 + \frac{A}{\sqrt{2\pi}wx} e^{-\frac{[\ln \frac{x}{x_c}]^2}{2w^2}}$$

Os parâmetros considerados na equação seguem em forma representativa na figura 32.

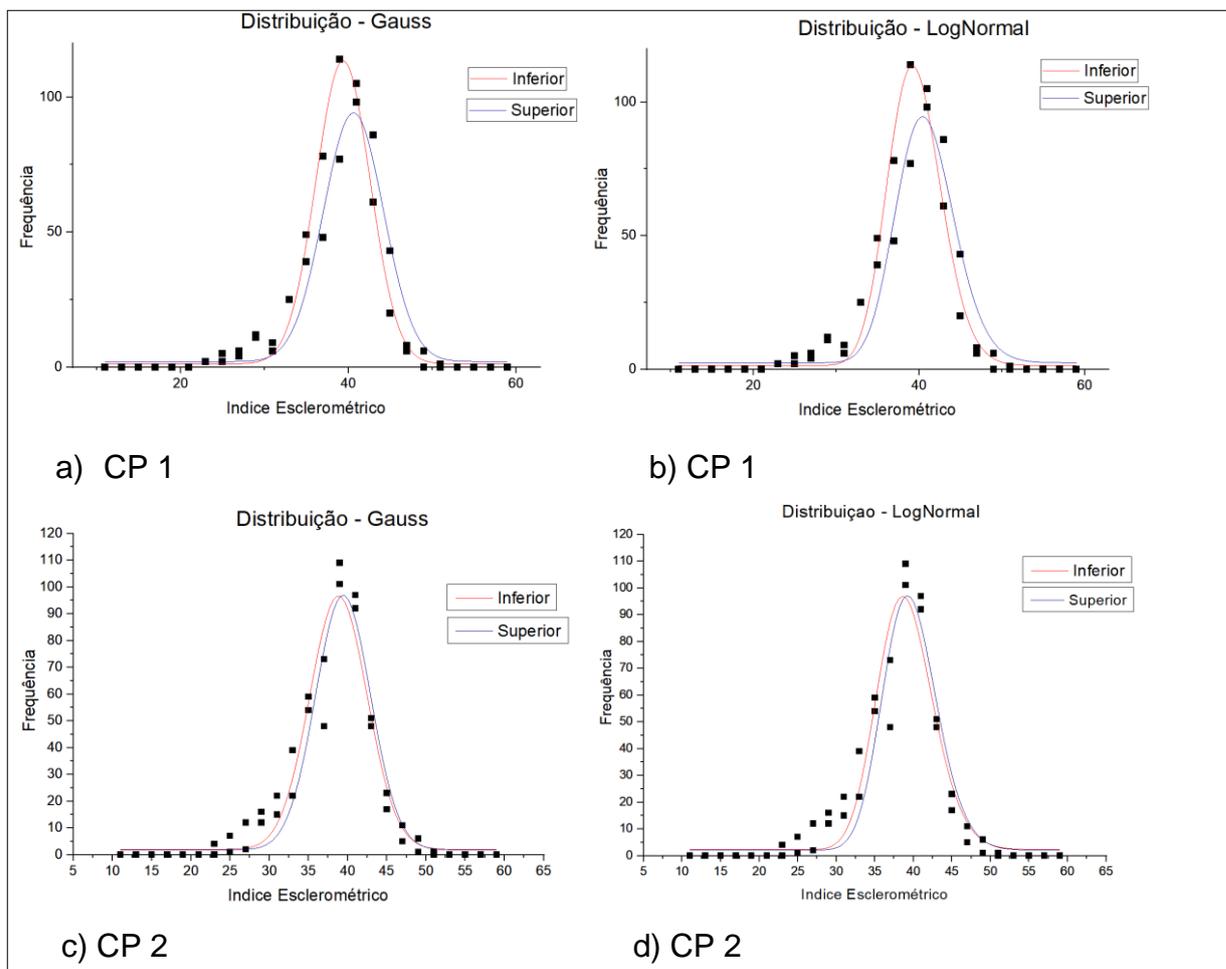
Figura 32 – Parâmetros considerados na distribuição de LogNormal.



Fonte: OriginLab (2019).

Dessa forma, a figura 33 mostra a distribuição normal e lognormal para as superfícies inferiores e superiores referentes ao concreto com traço I.

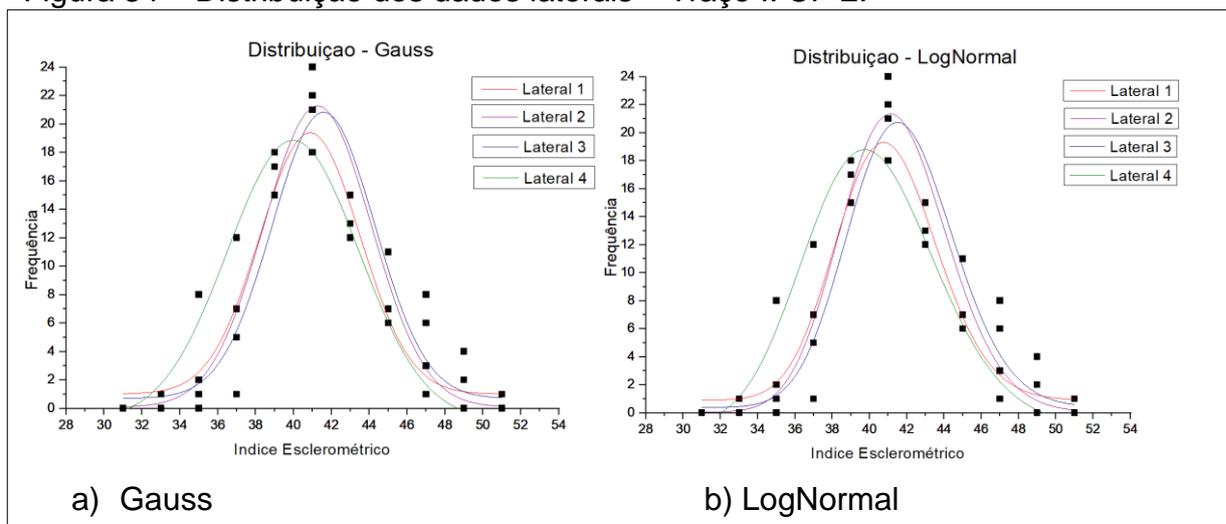
Figura 33 – Distribuição dos dados superficiais – Traço I.



Fonte: Autoria própria (2019).

As distribuições de frequência para as laterais do prisma estão apresentadas nas figuras 34, Gauss e LogNormal.

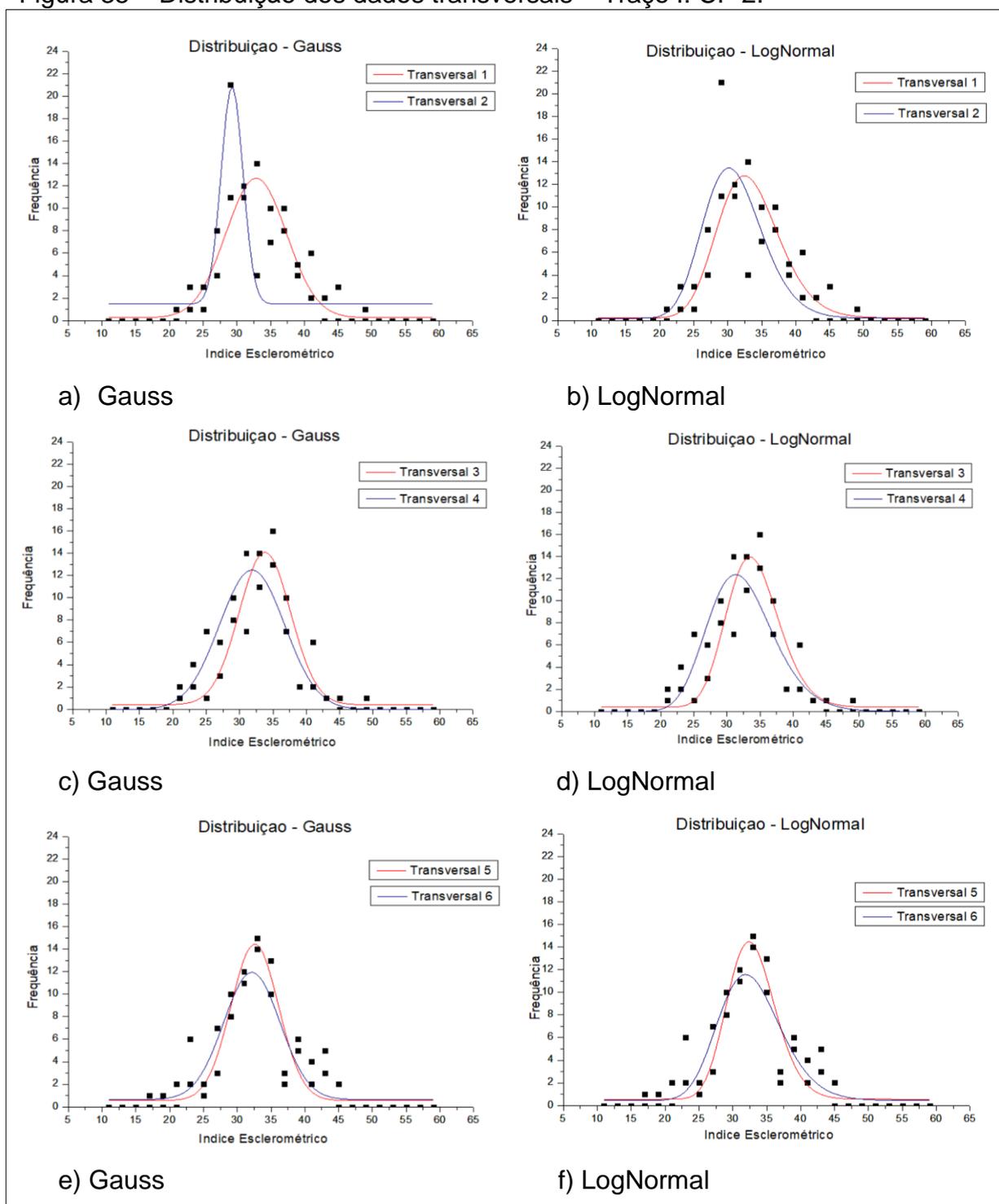
Figura 34 – Distribuição dos dados laterais – Traço I: CP 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

A figura 35 mostra a curva de distribuição das seções transversais do corpo de prova 2 de traço I.

Figura 35 – Distribuição dos dados transversais – Traço I: CP 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

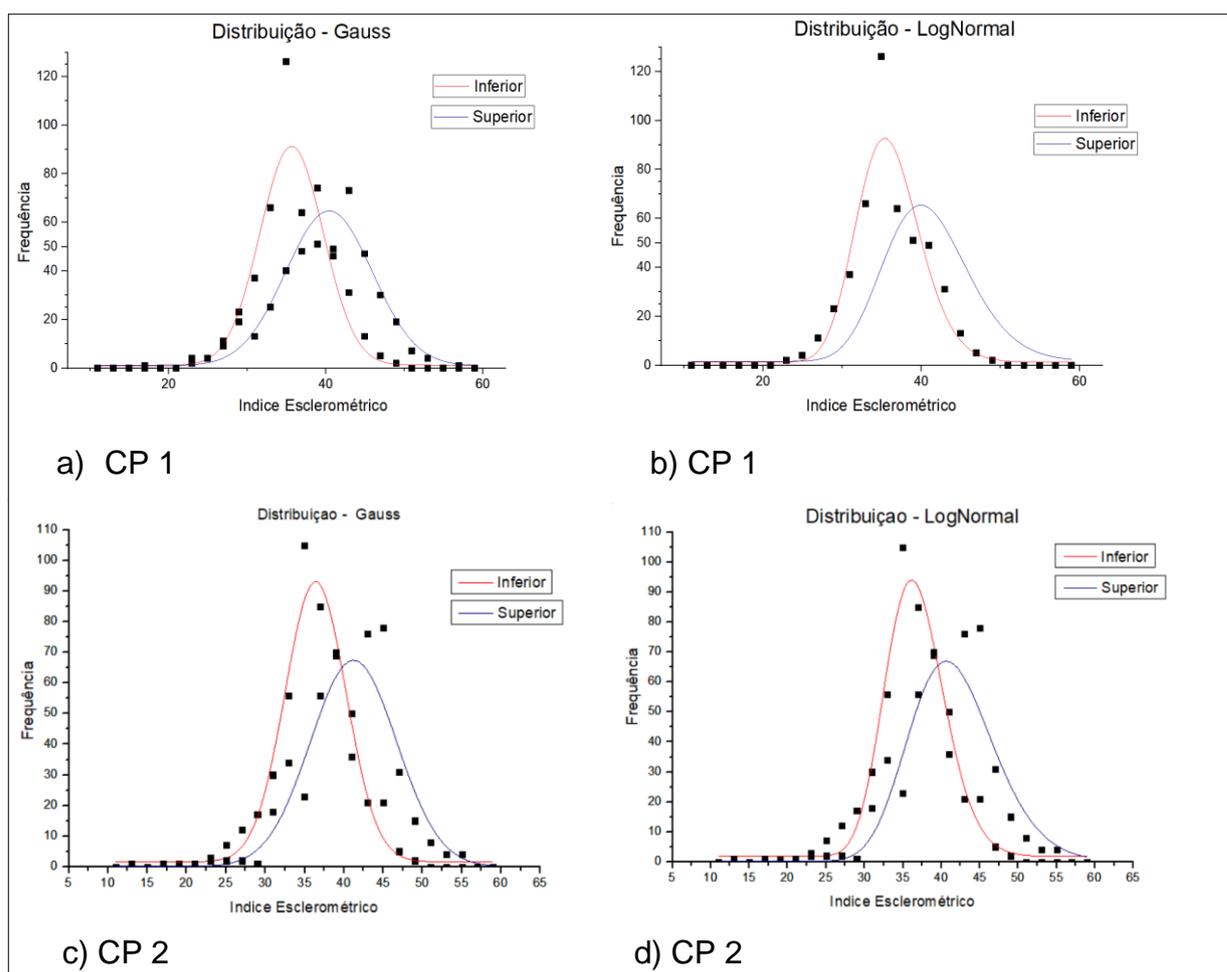
As curvas de distribuição normal ou de Gauss e LogNormal se caracterizam por considerarem dois parâmetros, a média populacional e o desvio padrão. A partir dessa informação e analisando os gráficos anteriores, é perceptível que o concreto

que utiliza a brita 0 apresenta uma menor discrepância de IE nas faces externas do que no interior do corpo.

As análises gráficas demonstram que as faces externas também indicam uma frequência maior de durezas superficiais mais altas, na ordem de 40 a 45, já no interior os valores de índices esclerométricos de 30 a 35 são predominantes.

Em seguida, serão apresentadas as distribuições para o segundo traço e seus corpos de prova, prisma 1 e prisma 2. A figura 36 mostra as curvas de distribuição normal para as superfícies.

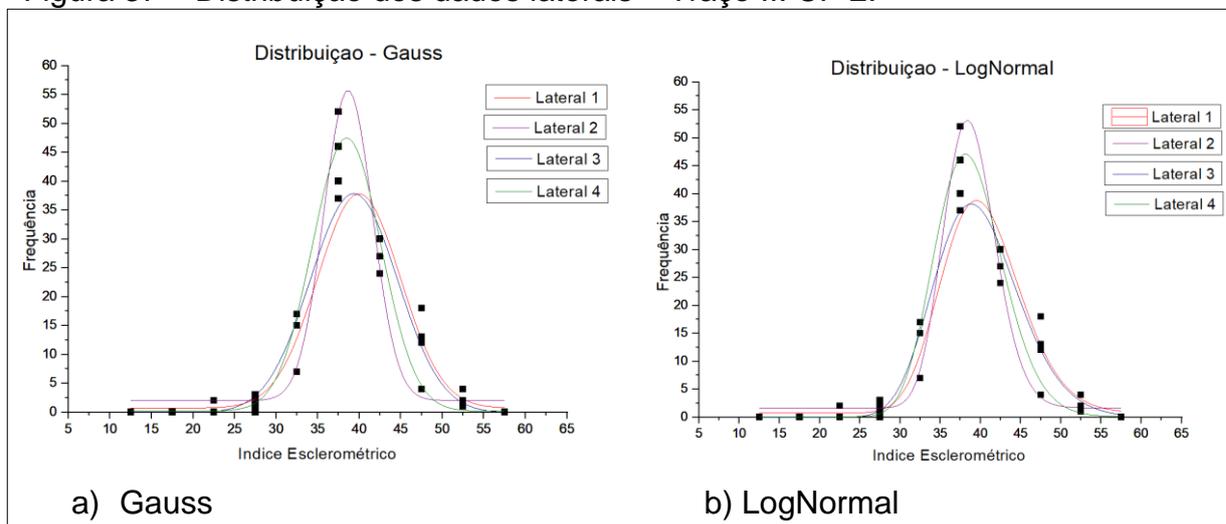
Figura 36 – Distribuição dos dados superficiais – Traço II.



Fonte: Autoria própria (2019).

As distribuições de frequência para as laterais do prisma estão apresentadas na figura 37.

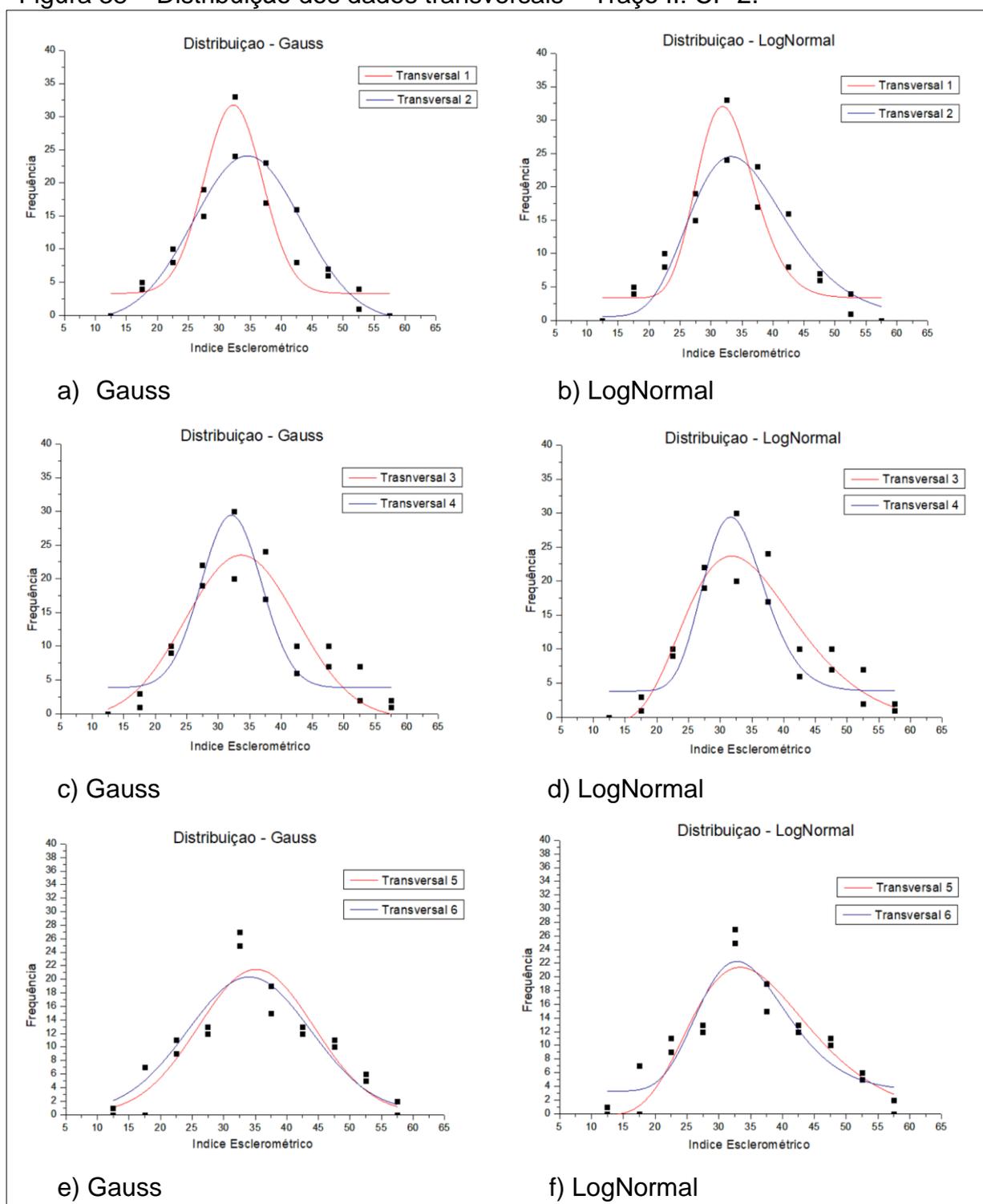
Figura 37 – Distribuição dos dados laterais – Traço II: CP 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

A figura 38 mostra a curva de distribuição normal das seções transversais.

Figura 38 – Distribuição dos dados transversais – Traço II: CP 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

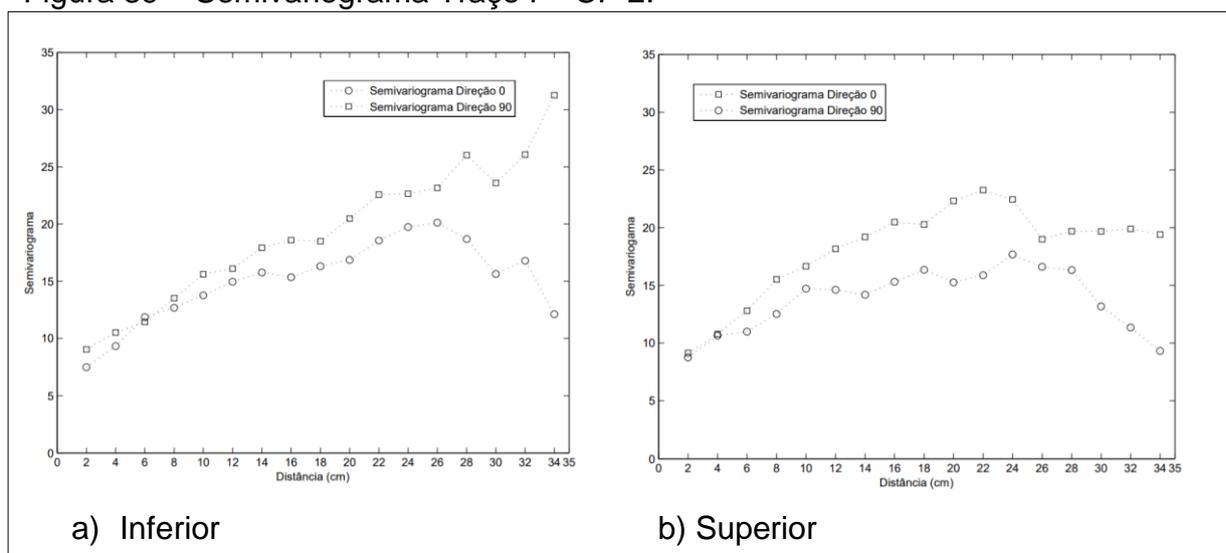
O concreto constituinte pela brita 2 apresentou maior divergência dos resultados até mesmo nas faces externas, as superfícies inferior e superior não são tão semelhantes entre si como no caso do concreto com brita 0. O que pode ter ocorrido devido ao fato de no processo de regularização da superfície o concreto do traço II exigir uma retirada maior de argamassa superficial para que se tornasse menos irregular.

As laterais do concreto com traço II apresentaram praticamente o dobro de frequência de IE do que as mesmas regiões do traço I, ou seja, no concreto com a brita 2 os índices de dureza foram mais concentrados.

Nas seções transversais não houve tanta divergência entre o traço I e II nos valores de dureza obtidos, mas sim a frequência em que eles ocorreram, as regiões compostas pelo agregado brita 2 obtiveram frequências maiores para os mesmos valores de dureza do concreto com brita 0.

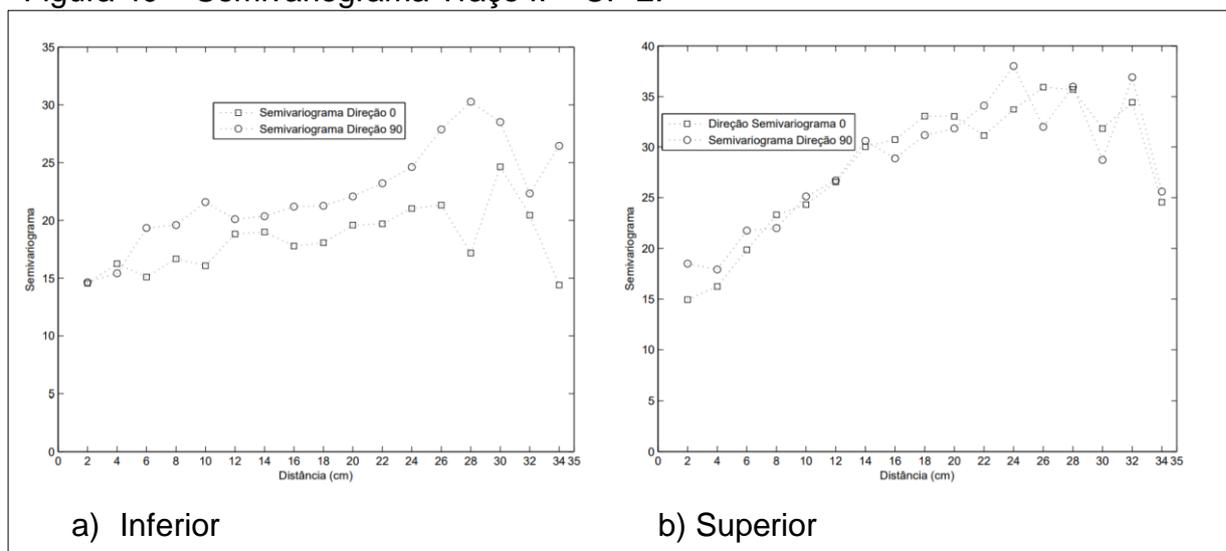
A variação espacial da dureza superficial do concreto em estudo é descrita tanto qualitativa quanto quantitativamente pelos gráficos de semivariograma, o qual expressa a variabilidade espacial numa direção pré-definida. Analisando as superfícies com maior quantidade de dados coletados, foram gerados semivariogramas para as superfícies inferior e superior dos segundos corpos de prova referentes ao traço I, figura 39, e traço II, figura 40.

Figura 39 – Semivariograma Traço I – CP 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 40 – Semivariograma Traço II – CP 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

Os semivariogramas mostram o comportamento espacial dos índices esclerométricos em duas direções, a 0 e 90 graus considerando a superfície do prisma de 40x40 cm. O fato de as curvas apresentarem um comportamento semelhante nas duas direções confirma o conceito de tratar o concreto como um material homogêneo em escala macroscópica, suas propriedades não se comportam de forma anisotrópica.

Comparando as curvas referentes às brita 0 e 2, percebe-se que os picos no eixo y e apresentados pelo concreto com o agregado de maior granulometria são maiores. Esse desempenho nos diz que há uma maior variação nos dados do traço II.

O ajuste das curvas definiria o momento em que elas começam a apresentar estabilidade dos dados, ou seja, o comprimento em que as amostras não sofrem influência das amostras vizinhas. Analisando as curvas anteriores podemos perceber que, em torno de 10 cm as amostras se apresentam de forma independente uma das outras. Exceto pela superfície superior do traço II, onde esse comprimento se dá por volta dos 20 cm, essa diferença pode ser explicada pelo fato dessa superfície ter passado por processo de lixa mais agressivo que o concreto do traço I, devido a maior granulometria do agregado. Entretanto deve ser feito um estudo aprofundado para confirmar essas suposições.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho foi analisar a resistência de uma estrutura de concreto por meio do ensaio esclerométrico e verificar se e ocorre a variação desses resultados quando há mudança na dimensão do agregado graúdo. Foram ensaiados concreto de mesmo traço utilizando agregados com dimensão máxima característica de 12,5 mm, brita 0, e 25 mm, brita 2.

O método utilizado no ensaio possibilitou um mapeamento da dureza superficial e a distribuição espacial de regiões mais e menos duras. Mesmo o concreto tendo comportamento heterogêneo, o traço com a brita de menor dimensão apresentou um aspecto mais homogêneo do que as superfícies do concreto com brita 2, o que pode ser explicado pelo engrenamento dos grãos.

Os índices de dureza superficial obtidos foram correlacionados com a resistência a compressão do concreto por meio de curvas ajustadas em pesquisas anteriores. As resistências calculadas para o traço I foram semelhantes aos valores obtidos pelo rompimento dos corpos de prova, o que não foi tão significativo no traço II, o que pode ser justificado pelo fato da equação estar ajustada para concretos com agregados de granulometrias menores.

Por fim, a variação do agregado graúdo exerceu grande influência nos resultados obtidos, principalmente nas distribuições espaciais de dureza superficial. O agregado de maior granulometria apresentou regiões mais duras e maior heterogeneidade, principalmente nas faces que passaram por processo de lixa e nas seções transversais.

### 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para complementar os resultados obtidos com esse trabalho, alguns assuntos são sugeridos como trabalhos futuros, sendo eles:

- Realizar os procedimentos descritos combinando outro ensaio não destrutivo, como por exemplo o ultrassom;
- Analisar corpos de prova de maior dimensão para ampliar a área de ensaio e com isso melhorar os resultados das seções transversais;

- Realizar os ensaios não destrutivos combinados em uma estrutura de concreto armado;
- Analisar a partir dos ensaios descritos uma estrutura em campo de obra, com uma laje;
- Ajustar novas equações de correlações para idades superiores a 90 dias;
- Analisar a variância das amostras e definir o comprimento de correlação das propriedades do concreto, comparando misturas com diferentes agregados.

## REFERÊNCIAS

AÏTCIN, Pierre C. **High-Performance Concrete**. Quebec: E&FN Spon, 1998.

ALVES, Rogério. **Resistência mecânica de concreto de cimento Portland: correlação de ensaio à compressão axial com esclerometria**. 2017. 100 p. Dissertação (graduação). Centro Universitário Univates. Lajeado, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI – 228 – 1R – 89, **In place methods for determination of strength of concrete**, Detroit, 26 pp, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584**: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial: especificação. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **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.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais da construção**. 5. ed. Revisada, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CASTRO, Elisângela de. **Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria**. Uberlândia: Campus, 2009.

CONSTANTINIDES, G.; ULM, F.-J.; VLIET, K. Van. On the use of nanoindentation for cementitious materials. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v. 36, p. 191-196, 2003.

CONSTANTINIDES, G.; ULM, F.-J. The nanogranular nature of C–S–H. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 55, p. 64-90, 2007.

ESCOBAR, C. J.; CRUZ, D. A.; FABRO, G. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO ENDURECIDO **Avaliation of Concrete Rebound Hammer Performance of the tests with Hardened Concrete** Resumo. n. 11, 2011.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos**. Tese de Doutorado, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

FOCAOARU, I. **Romanian Achievements in Nondestructive Strength of Concrete**. In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp.35-56, 1984.

FONTANA, Tiago B. **Ensaio não destrutivo para determinação da resistência à compressão sob tensão**. 2015. 75 p. Dissertação (graduação). Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2015.

KATAYAMA, Daniela. **Estudo da influência da granulometria do agregado graúdo nas propriedades do concreto de alto desempenho**. 2016. 70 p. Dissertação (graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

JUNGES, B. M. B. **Estudo da distribuição espacial da dureza no concreto autoadensável**. 2016. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

MACHADO, Mauricio D. **Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos**. Rio de Janeiro, 294 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Fedreal do Rio de Janeiro, 2005.

MALHOTRA, V.; CARINO, N. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. United States of America: 2 ed. 2004.

MALHOTRA, V. M. **In Situ / Nondestructive Testing of Concrete - A Global Review**. In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp. 1-16, 1984.

MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto**. Microestrutura, propriedades e materiais. 2 ed .São Paulo: IBRACON, 751 p. 2014.

Palacios, Maria Del Pilar Guzman. **Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto**. Brasília, 2012. 182 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, 2012.

RIBEIRO JÚNIOR, Enio. Propriedades dos materiais constituintes do concreto. **Revista Especialize On-line IPOG**, Goiânia, v. 01, n. 10, ISSN 2179- 5568, texto digital. 2015.

SAMANIEGO, Yulena Tatiana Moreno. **Ensaio não destrutivo para avaliação da resistência do concreto: estudo de aplicação em obras**. Brasília: Campus, 2014.

Yun et al, "**Comparative evaluation of nondestructive methods for in-place strength determination**", Nondestructive Testing, Special Publication SP-112, American Concrete Institute, Detroit, pp111-136. 1988.