



BETÃO LEVE DE ESTRUTURAL APLICADO A SISTEMAS DE FACHADAS PRÉ-FABRICADAS

RODRIGO TERUAKI TAMURA

agosto de 2023

BETÃO LEVE ESTRUTURAL APLICADO A SISTEMAS DE FACHADAS PRÉ- FABRICADAS

RODRGO TERUAKI TAMURA

Dissertação

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES

Orientadora: Maria do Rosário Santos Oliveira (ISEP)

Co-Orientadora: Ligia Vitória Real (Universidade Presbiteriana Mackenzie - UPM)

Co-Orientadora: Maria da Luz Garcia (ISEP)

JULHO DE 2023

Eu , Rodrigo Teruaki Tamura, estudante nº 1210402, do Mestrado em Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto, declaro que não fiz plágio nem auto-plágio, pelo que o trabalho intitulado “Betão Leve Estrutural Aplicado a Sistemas de Fachadas Pré-Fabricadas” é original e da minha autoria, não tendo sido usado previamente para qualquer outro fim. Mais declaro que todas as fontes usadas estão citadas, no texto e na bibliografia final, segundo as regras de referência adotadas na instituição.

Porto e ISEP, 2023/07/30

A handwritten signature in black ink that reads "Rodrigo Tamura". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xvii
Abreviaturas	xix
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 Referencial teórico.....	3
CAPÍTULO 3 Metodologia.....	17
CAPÍTULO 4 Resultados e discussão.....	43
CAPÍTULO 5 Considerações Finais.....	77
Referências Bibliográficas	79
Anexo A – Planta pavimento tipo.....	83

RESUMO

O uso de peças pré-fabricadas em betão ganhou elevada relevância após a 2ª Guerra mundial ao redor do mundo e após 1960 no Brasil. Diversos autores citam as vantagens do seu uso, como por exemplo a redução do tempo de construção somados a uma maior durabilidade e qualidade de acabamento em peças aparentes da estrutura. Uma das limitações de seu uso é o peso das peças, que exigem equipamentos específicos para montagem. O presente estudo tem como objetivo o desenvolvimento de traços de betão leve utilizando um método de dosagem baseado no empacotamento de partículas para aplicação em peças painéis de betão pré-fabricado. Para a dosagem desses betões, foi utilizado um método de empacotamento de partículas, que consiste em otimizar a distribuição dos materiais utilizados (brita, argila, EPS, areia e cimento) preenchendo os vazios que ficam entre os materiais de maior de dimensão com aqueles de menor. Através dos ensaios realizados, os betões apresentaram resultados positivos chegando a atingir resistências acima dos 30 MPa e espalhamentos da ordem de 600 mm. Portanto, pode-se concluir que o método utilizado apresenta grande potencial quando objetivo estiver ligado a betões que utilizem agregados leves para peças pré-fabricadas. Analisando a relação entre a metodologia de cálculo utilizada, as verificações estruturais realizadas, os resultados obtidos e a aplicabilidade dos produtos finais gerados, pode-se concluir que sua aplicação gera impactos como redução do peso da estrutura e taxa de aço utilizado sem afetar o equilíbrio do elemento estrutural.

Palavras-chave: Pré-fabricada, betão leve, empacotamento de partículas.

ABSTRACT

The use of precast concrete parts gained high relevance after the 2nd World War around the world and after 1960 in Brazil. Several authors cite the advantages of its use, such as the reduction of construction time added to greater durability and high quality of finish in apparent parts of the structure. One of the limitations of its use is the weight of the pieces, which require specific equipment for assembly. The present study aims to develop lightweight concrete mixtures using a dosing method based on particle packing for application in precast concrete panels. For the dosage of these concretes, a particle packing method was used, which consists of optimizing the distribution of the materials used (gravel, clay, EPS, sand and cement) filling the voids that remain between the larger materials with those of smaller. Through the tests carried out, the concretes showed positive results reaching strengths above 30 MPa and slump-flow above 600 mm. Therefore, it can be concluded that the method used has great potential when the objective is linked to concrete that uses lightweight aggregates for prefabricated parts. Analyzing the relationship between the calculation methodology used, the structural checks carried out, the results obtained and the applicability of the final products generated, it can be concluded that its application generates impacts such as reducing the weight of the structure and the rate of steel used without affecting the balance of the structural behavior of the structural element.

Keywords: Precast concrete, lightweight concrete, particle packing.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar meus agradecimentos a Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), que desde o início da graduação forneceu diversas atividades que me impulsionaram a prestar e realizar o programa de dupla titulação em conjunto com o Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Em seguida gostaria de prestar meus agradecimentos a minha família e amigos, em especial ao meus pais que sempre me apoiaram em todas as decisões e rumos que escolhi tomar, sendo o momento mais marcante até a data em que escrevo este trabalho o intercâmbio realizado em Porto – Portugal, aonde tive um semestre repleto de novas experiências.

Aos meus colegas, gostaria de agradecer por todo suporte físico e/ou emocional que me ofereceram enquanto elaborava o presente trabalho, em especial ao meu caro amigo Rafael Gonçalves que além de ter me auxiliado na análise estrutural do presente trabalho, fez parte do início das pesquisas sobre o tema de empacotamento de partículas enquanto estávamos no mesmo grupo de pesquisa.

Por fim gostaria de agradecer o apoio e compreensão de minhas orientadoras, que me apoiaram a realizar a pesquisa apresentada.

ÍNDICE DE TEXTO

1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Objetivos.....	2
2.1	Betão.....	3
2.1.1	Betão Leve.....	3
2.1.2	Betão de alto desempenho.....	3
2.2	Pré-Fabricação.....	4
2.2.1	Painéis de betão Pré-fabricado.....	5
2.3	Empacotamento de Partículas na Dosagem de Betão.....	6
2.3.1	Empacotamento de partículas (EP).....	6
2.3.2	Modelos de Empacotamento de partículas.....	7
2.3.3	Betão dosado através do E.P.....	8
2.3.4	Modelos de protótipos para painéis de betão.....	14
3.1	Dosagem do betão.....	17
3.1.1	Caracterização dos materiais.....	19
3.1.2	Construção das curvas granulométricas.....	25
3.2	Curvas granulométricas calculadas.....	30
3.3	Corpos de prova.....	31
3.4	Ensaio estado fresco.....	34
3.5	Ensaio estado endurecido.....	34
3.6	Análise estrutural.....	36
3.6.1	Modelo TQS.....	37
4.1	Ensaio no estado fresco.....	43

4.2	Ensaio no estado endurecido	45
4.2.1	Características corpos de prova.....	45
4.2.2	Resistência à compressão.....	49
4.2.3	Tração por compressão diametral.....	51
4.2.4	Tração por flexão	54
4.2.5	Velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	57
4.3	Reformulação traço com EPS.....	57
4.3.1	Ensaio estado fresco	61
4.3.2	Características dos corpos de prova	61
4.3.3	Resultados no estado endurecido	62
4.4	Modelo estrutural.....	66
4.4.1	Cargas	66
4.4.2	Gráficos resultantes.....	66
4.4.3	Armadura mínima.....	68
4.4.4	Armadura calculada.....	73
4.4.5	ANALISE GLOBAL.....	75
5.1	Conclusões	77
5.2	Desenvolvimentos Futuros	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esqueleto de betão pré-fabricado, parque de estacionamento Green Apple. [27].....	4
Figura 2.2 – Representação sistemas mono disperso e polidisperso. [29]	6
Figura 2.3 - Fluxograma de processos. [31].....	9
Figura 2.4 – Tabela com divisão dos corpos de prova para os ensaios. [31]	9
Figura 2.5 – Tabela com propriedades físicas dos materiais. [31]	10
Figura 2.6 – Curvas de distribuição granulométrica (Agregados Miúdos). [31].....	10
Figura 2.7 – Curvas de distribuição granulométrica (Agregados Graúdos). [31]	10
Figura 2.8 – Curvas de distribuição granulométrica a laser (Cimento e sílica ativa). [31]	11
Figura 2.9 – Tabela com composição dos betões de referência. [31].....	11
Figura 2.10 – Curva de distribuição granulométrica (C25-R). [31].....	12
Figura 2.11 – Curva de distribuição granulométrica otimizada (C25-OT). [31].....	12
Figura 2.12 – Tabela proporção dos materiais particulados dos betões otimizados. [31]	13
Figura 2.13 – Evolução da resistência média à compressão dos betões convencionais. [31]	13
Figura 2.14 – Evolução da resistência média à compressão dos betões de alta resistência. [31].....	14
Figura 2.15 – Painél maciço. [32]	15
Figura 2.16 – Painél com placa de poliuretano. [32].....	15
Figura 2.17 – Painél com poliestireno expandido. [32].....	15
Figura 2.18 – Ensaio de tração na flexão. [32]	16
Figura 3.1 – Esquema sequência da metodologia adotada.....	18
Figura 3.2 – Gráfico curva granulométrica, areia.	20
Figura 3.3 – Gráfico curva granulométrica, brita.....	21
Figura 3.4 – Caracterização, argila expandida.....	22

Figura 3.5 – Cuva granulométrica, argila expandida.	23
Figura 3.6 – Foto ensaio de massa específica, cimento.	23
Figura 3.7 – Foto ensaio de massa específica, cimento.	24
Figura 3.8 – Gráfico curva granulométrica CPV ARI HOLCIM.	24
Figura 3.9 – Gráfico curva granulométrica ideal ($q = 0,23$).	26
Figura 3.10 – Granulometria interpolada, areia.	27
Figura 3.11 – Granulometria interpolada, brita.	28
Figura 3.12 – Granulometria interpolada, argila expandida.	29
Figura 3.13 - Gráfico curvas granulométricas dos materiais interpolados.	29
Figura 3.14 – Gráfico curva granulométrica, traço com brita.	30
Figura 3.15 – Gráfico curva granulométrica, traço com argila.	30
Figura 3.16 – Desenho esquemático da forma protótipo	31
Figura 3.17 – Foto forma protótipo de painel em madeira.	32
Figura 3.18 – Foto CP's TREF.	32
Figura 3.19 – Foto CP's TARG.	33
Figura 3.20 – Foto CP's TEPS1.	33
Figura 3.21 – Foto prensa Instron.	35
Figura 3.22 - Foto ensaio de tração na flexão.	36
Figura 3.23 – Modelo estrutural.	37
Figura 4.1 – Foto <i>slump flow</i> TREF.	43
Figura 4.2 – Foto <i>slump flow</i> TARG.	44
Figura 4.3 – Foto <i>slump flow</i> TEPS1.	44
Figura 4.4 – Gráfico resistência a compressão.	49
Figura 4.5 – Foto CP submetido ao ensaio de compressão TREF.	50
Figura 4.6 – Foto CP submetido ao ensaio de compressão TARG.	50
Figura 4.7 – Foto CP submetido ao ensaio de compressão TEPS1.	51
Figura 4.8 – Gráfico resistência a tração por compressão diametral.	52

Figura 4.9 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TREF.	52
Figura 4.10 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TARG.	53
Figura 4.11 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TEPS1.	53
Figura 4.12 – Gráfico resistência a tração na flexão.	54
Figura 4.13 – Foto protótipo submetido ao ensaio de tração na flexão TREF.	55
Figura 4.14 – Foto protótipo submetido ao ensaio de tração na flexão TARG.	55
Figura 4.15 – Foto protótipo submetido ao ensaio de tração na flexão TEPS1.	56
Figura 4.16 – Gráfico resultados dos ensaios dinâmicos.	56
Figura 4.17 – Foto CP teste TEPS2.	59
Figura 4.18 – Foto CP teste TEPS3.	59
Figura 4.19 – Foto CP teste TEPS4.	60
Figura 4.20 – Foto slump <i>Flow</i> TEPS3.	61
Figura 4.21 – Gráfico resultados compressão TEPS1 e TEPS3.	63
Figura 4.22 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TEPS3.	63
Figura 4.23 – Gráfico resultados tração por compressão TEPS3.	64
Figura 4.24 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TEPS3.	64
Figura 4.25 – Resultados tração na flexão TEPS3.	65
Figura 4.26 – Foto CP submetido ao ensaio de tração na flexão TEPS3.	65
Figura 4.27 – Gráficos V101 TREF.	67
Figura 4.28 – Gráficos V101 TARG.	67
Figura 4.29 – Gráficos V101 TEPS3.	68
Figura 4.30 – Armadura V101 TREF.	69
Figura 4.31 – Dados P1 dimensionado TREF.	69
Figura 4.32 – Dado P2 dimensionado TREF.	70
Figura 4.33 – Armadura V101 TARG.	70
Figura 4.34 – Dados P1 dimensionado P1.	71
Figura 4.35 – Dados P2 dimensionado TARG.	71

Figura 4.36 – Armadura V101 TEPS3.....	72
Figura 4.37 – Dados P1 dimensionado TEPS3.	72
Figura 4.38 – Dados P2 dimensionado TEPS3.	73
Figura 4.39 – Quantidade de aço V101 TREF.....	73
Figura 4.40 – Quantidade de aço V101 TARG	74
Figura 4.41 – Quantidade de aço V101 TEPS3.....	74
Figura 4.42 – Quantidade aço TREF.....	75
Figura 4.43 – Quantidade de aço TARG.....	75
Figura 4.44 – Quantidade de aço TEPS3.....	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Traços dosados para moldagem dos protótipos. [32]	15
Tabela 3.1 – Quadro materiais utilizados na composição dos traços.	18
Tabela 3.2 – Ensaio granulométrico, areia rosa.	19
Tabela 3.3 – Ensaio granulométrico, brita.	21
Tabela 3.4 – Ensaio granulométrico, argila expandida.	22
Tabela 3.5 – Coeficientes de distribuição q.....	25
Tabela 3.6 – Traços unitários.....	31
Tabela 3.7 – Classes de espalhamento do CAA e aplicações (adaptado).....	34
Tabela 3.8 – Classes de índice de estabilidade visual do CAA (adaptado).....	34
Tabela 3.9 – Ensaio no estado endurecido.	35
Tabela 3.10 – Tabela de resistências do betão utilizado (Lajes, Vigas e Fundações).....	38
Tabela 3.11 – Tabela de resistências do betão utilizado (Pilares).....	38
Tabela 3.12 – Tabela com módulo de elasticidade adotado.....	38
Tabela 3.13 – Tabela com características do aço utilizado para armadura passiva.....	39
Tabela 3.14 – Tabela com características do aço utilizado para armadura ativa.....	39
Tabela 3.15 – Tabela com cobrimentos adotados.	39
Tabela 3.16 – Tabela com ações e combinações adotadas (TREF).	39
Tabela 3.17 – Tabela com ações e combinações adotadas (TARG).	40
Tabela 3.18 – Tabela com ações e combinações adotadas (TEPS).....	40
Tabela 3.19 – Tabela com os resultados de carga dos ventos.	40
Tabela 3.20 – Tabela com resumo das combinações no modelo global.....	42
Tabela 4.1 – Resultados no estado fresco.....	45

Tabela 4.2 – TREF 7 dias.	46
Tabela 4.3 – TARG 7 dias	46
Tabela 4.4 – TEPS1 7 dias.....	47
Tabela 4.5 – TREF 28 dias.	47
Tabela 4.6 – TARG 28 dias.	48
Tabela 4.7 – TEPS 28 dias.	48
Tabela 4.8 - Resistências protótipos referência com diferentes materiais.....	54
Tabela 4.9 - Velocidades de propagação e módulo de elasticidade dinâmico.....	57
Tabela 4.10 – Traços com EPS.	58
Tabela 4.11 – Resultados ensaios no estado fresco	61
Tabela 4.12 – Características TEPS3 7 dias.....	62
Tabela 4.13 – Características TEPS3 28 dias.....	62
Tabela 4.14 – Resultados ultrassom TEPS3	66
Tabela 4.15 – Tabela de cargas.....	66
Tabela 4.16 – Relação massa específica x Aço	76

ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CAA – Concreto Auto-Adensável.

CP – Corpo de prova.

CV – Concreto convencional.

EMMA – Elkem Materials Mixture Analyser.

EPS – Poliestireno expandido.

IEV – Índice de estabilidade visual.

NBR – Normas Técnicas Brasileiras.

NM – Normas Técnicas do Mercosul.

SVVIE – Sistemas de Vedação Interno e Externo.

TARG – Traço com argila expandida.

TEPS – Traço com esfera de poliestireno expandido.

TQS – Software para projetos estruturais.

TREF – Traço referência com brita.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O uso de peças pré-fabricadas de betão armado é cada vez mais recorrente na construção civil, devido sua praticidade. Diversas vantagens podem ser encontradas na sua aplicação, como velocidade na construção e aumento na durabilidade da construção e fatores ambientais, como redução da poluição sonora causada pela grande quantidade de caminhões betoneiras. Contudo, existem fatores que podem dificultar a aplicação, como o transporte e montagem devido ao peso das peças e a necessidade de equipamentos robustos.

A pré-fabricação apresenta uma série de benefícios reconhecidos, que podem valer como pontuação em certificações internacionais, como por exemplo na categoria de auxiliar de design sustentável pela *Leadership in Energy & Environmental desing* (LEED), sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações reconhecido mundialmente, que por sua vez apresenta diversos benefícios, como por exemplo uma diminuição dos riscos regulatórios e estímulo a políticas públicas de fomento a Construção Sustentável. O uso de peças pré-fabricadas podem garantir até 27 pontos para obtenção do certificado LEED [30].

Para garantir o desempenho dos elementos pré-fabricados o betão utilizado deve ser de boa qualidade. Métodos como o empacotamento de partículas, utilizado para dosagem de betões de ultra alto desempenho, já apresentam diversos estudos aplicados devido a sua proposta para otimizar a distribuição das partículas dos materiais que constituem o betão [20].

O betão leve, geralmente produzido substituindo parte dos agregados convencionais por agregados com densidades menores, muitas vezes é utilizado em países com regiões vulcânicas devido ao tipo de matéria prima encontrada nesses locais, que por sua vez apresenta propriedades benéficas como isolamento térmico e baixa densidade [35].

1.2 OBJETIVOS

Dentro das fábricas de pré-fabricados, podem ser encontradas peças de betão para superestruturas como pontes, viadutos e túneis ou para uso residencial e comercial (edifícios). Entre os elementos pré-fabricados, utilizados para uso em edifícios, os painéis de vedação são uma das soluções que podem ser incorporadas a edificação.

Portanto o seguinte trabalho tem como objetivo:

- Desenvolver um betão leve de alto desempenho;
- Desenvolver protótipos de painéis maciços pré-fabricados;
- Avaliar o desempenho do betão comparando com resultados apresentados em estudos com objetivos semelhantes (protótipos) e/ou método de dosagem igual;
- Avaliar o impacto de painéis pré-fabricados com o betão dosado através de cargas distribuídas acima das vigas de contorno em modelo estrutural;

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BETÃO

O betão de Cimento Portland é classificado como um material formado pela mistura de cimento, água e agregados miúdos e graúdos, podendo também ser incorporado com outros componentes como: aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolânicos [11].

Conforme citado na NBR 12655 [11], o betão de cimento portland apresenta algumas variações como: betão pré-moldado, betão pré-fabricado, betão normal, betão leve, betão pesado ou denso, entre outros.

2.1.1 Betão Leve

Conforme apresentado pela NBR 8953 [6] o betão convencional apresenta uma massa específica seca em torno de 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3 . Já o betão leve apresenta valores abaixo dos 2000 kg/m^3 , e leva em sua composição agregados leves como por exemplo: argila expandida, escória siderúrgica, ardósia, entre outros. Seu uso recebe grande destaque quando comparados o peso próprio da estrutura, onde o uso do betão leve reduz significativamente o peso da estrutura, conseqüentemente reduz o custo, por exemplo, nas estruturas de fundação [22].

2.1.2 Betão de alto desempenho

Classificado como um material que apresenta características específicas, como elevadas durabilidade e resistência e para que o betão cumpra com essas necessidades, a escolha e dosagem dos materiais empregados deve ser feita minuciosamente [36]. Classificados como grupo 2 pela NBR 8953 [6], os betões de alta resistência são aqueles que apresentam classe de resistência a compressão acima dos 50 MPa, ou seja, aqueles classificados a partir da classe C55.

2.2 PRÉ-FABRICAÇÃO

Segundo NBR 9062 [7] o betão pré-fabricado é aquele executado industrialmente, em instalações fixas como indústrias que tem como finalidade a produção desses elementos. Já os betões pré-moldados são aqueles moldados previamente e fora do local de utilização definitiva.

Uma estrutura de betão pré-fabricado é um conjunto de elementos pré-moldados que, quando conectados juntos, formam uma estrutura tridimensional capaz de resistir aos esforços vindos da gravidade, ventos e pesos próprio. O método construtivo é indicado para construção de edifícios como escritórios, escolas, estacionamentos, entre outros [27].

O volume de betão dos elementos estruturais (pilares, vigas e lajes) de uma estrutura pré-fabricada, corresponde a aproximadamente 4% do volume bruto que o edifício ocupará. Um exemplo de estrutura pré-fabricada pode ser vista na Figura 1.1 onde está representado o parque de estacionamento Green Apple, onde é possível verificar a presença de pilares, vigas, lajes, escadas e núcleos de escadas pré-fabricados [27].



Figura 2.1 - Esqueleto de betão pré-fabricado, parque de estacionamento Green Apple. [27]

Chastre *et al.* (2012) acrescentam que a produção de estruturas com elementos pré-fabricados passa pela fabricação de elementos em ambientes mais controlados, o que garante uma maior qualidade e durabilidade para a estrutura, sendo essa uma das vantagens quando comparadas com estruturas moldadas *in situ*. Contudo o método também apresenta desvantagens, um exemplo apresentado são as ligações entre os elementos, que quando mal projetadas ou mal executadas, podem gerar problemas graves como a distribuição de cargas para os elementos errados ou criação de fissuras e trincas em locais que normalmente não apresentariam essas manifestações patológicas.

Marques & Schmitz (2022) apresentam em seu estudo uma análise de custos e tempo comparando dois métodos construtivos de fechamento diferentes. O primeiro, alvenaria estrutural apresentou um custo total de R\$ 114.748,94 com um cronograma de 88 dias, enquanto que se utilizado painéis pré-moldados o custo seria de R\$ 160.592,32 com um prazo de 58 dias. Os autores concluem que financeiramente a primeira opção é sem dúvidas a melhor escolha se considerado a escassez de mão de obra especializada para a obra, assim como disponibilidade dos materiais (painéis).

2.2.1 Painéis de betão Pré-fabricado

Barth *et al.* (2016) dividem os painéis de betão arquitetônicos em três categorias:

- Maciço: painel plano e maciço. Painel com menores custos e limitações como dimensões e resistência térmica;
- Nervurado: apresenta o interno nervurado e o externo liso, formando uma câmara de ar, que auxilia no desempenho térmico;
- Sanduíche com livre movimentação: composto por duas camadas de betão unidas por meio de um cilindro ou placa central, que reduzem a ponte térmica;

Enquanto que segundo a NBR 16475 [15], os painéis pré-fabricados podem ser classificados levando em consideração sua seção transversal (maciços, alveolares, reticulados misto, sanduíche, nervurados e de parede dupla), utilização (residencial, comercial ou industrial), função de acabamento (parede bruta ou arquitetônica) e função estrutural (estrutural ou não estrutural).

Classificados como Sistema de Vedação Interno e Externo (SSVIE) pela NBR 15575-4 [12], os SSVIE são um sistema construtivo que pode ser dividido em três elementos sendo eles: Vedações, Revestimentos e Esquadrias.

Segundo Oliveira *et al.* (2003) os SSVIE tem a função de fornecer, junto a esquadrias e revestimentos, condições de habitabilidade para o edifício, sendo o mediador entre os meios externo e interno. O sistema deve apresentar características que consigam modificar as condições interiores de acordo com a vontade do usuário, além de apresentar funções estéticas e estruturais para o construção.

Além das características apresentadas acima, Sabbatini *et al.* (2001) classificam os sistemas de vedação, em relação a sua posição podendo ser externa (fachadas) ou interna, quanto a sua execução sendo por moldagem a úmido ou acoplamento, sua densidade superficial podendo ser leve com densidades de 60 a 100 kg/m², ou pesada com densidades superiores a 100 kg/m², quanto a sua estruturação: auto-suporte ou estruturada, quanto a continuidade do pano: contínua ou descontínua e por fim quanto à sua continuidade superficial: monolítica ou modular.

Medeiros *et al.* (2014), acrescenta que as vedações externas ou de fachadas não fazem parte da estrutura principal do edifício, contudo precisam ser dimensionadas para resistir aos esforços resultantes dos ventos, cargas acidentais, peso próprio e sismos em Portugal.

Os painéis de betão pré-fabricado são uma das soluções que podem ser utilizadas para compor o SSVIE. O uso desse tipo de peça de betão está diretamente ligado um método construtivo econômico, durável, estruturalmente seguro e versátil [1].

2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS NA DOSAGEM DE BETÃO

2.3.1 Empacotamento de partículas (EP)

O empacotamento de partículas, pode ser definido como uma escolha mais precisa dos materiais que irão compor um aglomerado, onde deve ser feita a seleção da proporção e tamanho adequado de cada partícula, com o objetivo de preencher os vazios com partículas menores e assim sucessivamente [24].

O E.P. pode ser dividido em dois sistemas distintos, sendo eles denominados: monodisperso, que consiste em um sistema composto por grãos esféricos de mesma dimensão e polidisperso, composto por um sistema de partículas com diversas dimensões que preenchem os vazios presentes entre si. A seguir na Figura 2.2 pode ser visto uma representação dos sistemas apresentados acima [29].

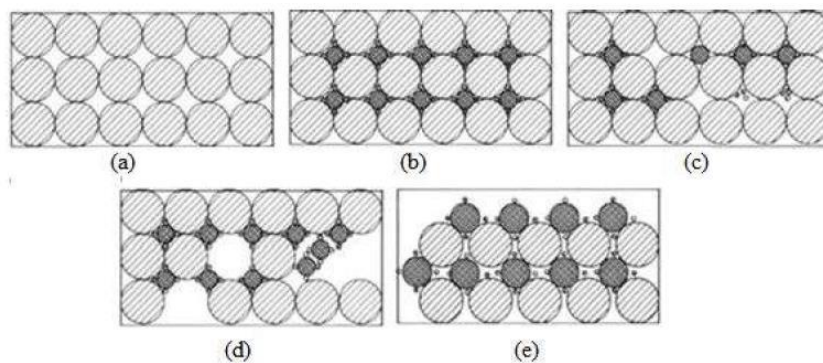


Figura 2.2 – Representação sistemas mono disperso e polidisperso. [29]

Acima estão representados pela figura 2.2.a o sistema monodisperso e 2.2.b o sistema polidisperso. Os demais componentes apresentam: um sistema com falta de partículas menores (2.2.c), um sistema com a presença de partículas maiores (2.2.d) e por fim um sistema com uma má distribuição de partículas (2.2.e).

2.3.2 Modelos de Empacotamento de partículas

Segundo Castro *et al.* (2009), a primeira publicação feita abordando o assunto foi feita por Féret em 1892, onde apresentou a possibilidade de selecionar os tipos de agregados junto da relação entre a porosidade do material (betão).

A partir desse primeiro estudo, diversos pesquisadores começaram a buscar soluções para que fosse possível compreender melhor como aplicar a metodologia do E.P. em betões. Após algum tempo modelos de empacotamento foram apresentados, sendo ferramentas para calcular a densidade de empacotamento das partículas, otimizando as misturas granulares do betão (Castro *et al.*, 2009).

Os modelos de empacotamento podem ser divididos em dois grupos: modelo discreto e modelo contínuo [29]. Cada modelo é baseado em uma equação, utilizada para produção das curvas granulométricas dos componentes do betão.

Em 1928, Furnas desenvolveu seu modelo de E.P. em que o empacotamento mais denso das partículas ocorreria em composições binárias, com o uso de partículas monodispersas. Contudo em 1931 seu modelo foi aperfeiçoado, apresentando um novo modelo onde considerou que o máximo empacotamento aconteceria na presença de três ou mais tamanhos de partículas discretas, variando suas quantidades e dimensões, gerando por fim a Equação 2.1 [29].

$$CPFT = 100 * \left(\frac{r^{\log D} - r^{\log DS}}{r^{\log DL} - r^{\log DS}} \right)^n \quad (2.1)$$

Onde:

CPFT – Porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D (%);

D – Diâmetro da partícula (μm);

Ds – Diâmetro da menor partícula (μm);

DL – Diâmetro da maior partícula (μm);

r – Razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas.

O modelo contínuo de E.P. considera que seja possível um sistema de distribuição apresentar varios tamanhos de partículas para o mesmo material, o tornando um sistema polidisperso [29]. Proposto por Fuller e Thompson, a Equação 2.2 foi desenvolvida para o estudo.

$$CPFT = 100 * \left(\frac{D}{D_{m\acute{a}x}} \right)^n \quad (2.2)$$

Onde:

CPFT – Porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (%);

$D_{máx}$ – Diâmetro da maior partícula (μm);

n – Coeficiente igual a 0,45.

Estudando os trabalhos apresentados por Fuller, Thompson e Furnas. Um novo modelo foi desenvolvido, denominado Andreasen & Andersen (A&A), apresentado pela Equação 2.3 [29].

$$CPFT = 100 * \left(\frac{D}{D_L} \right)^q \quad (2.3)$$

Onde:

DL – Diâmetro da maior partícula (μm);

q – Coeficiente de distribuição, valores entre 0,33 e 0,50.

Por fim o último modelo apresentado, e também o utilizado pelos pesquisadores. Desenvolvido por Funk e Dinger, baseado no modelo de Andreasen, conhecido como modelo de Alfred e apresentado pela Equação 1.4, diferente das equações apresentadas anteriormente o modelo considera o fator de proporcionalidade inexistente no modelo de Furnas e o tamanho da menor partícula não considerado por Andreasen [29].

$$CPFT = 100 * \left(\frac{D^q - D_{mín}^q}{D_{máx}^q - D_{mín}^q} \right) \quad (2.4)$$

Onde:

$D_{mín}$ – Diâmetro da menor partícula;

$D_{máx}$ – Diâmetro da maior partícula;

q – Coeficiente de distribuição, variável.

2.3.3 Betão dosado através do E.P.

A utilização dos modelos de empacotamento vem sendo utilizado para produção de betões especiais como Betão de Elevado Desempenho (BED) ou Ultra High Performance Concrete (UHPC). Para exemplificar uma aplicação dos modelos de E.P., será apresentado a seguir os procedimentos seguidos por Lopes (2019) em seu estudo, onde o pesquisador adotou traços de referência e através do modelo de Alfred modificou os traços.

A pesquisa de Lopes (2019) foi dividida em etapas indo desde a separação e caracterização dos materiais até a moldagem e avaliação dos resultados obtidos, o Lopes apresenta em seu estudo um fluxograma para um melhor entendimento (Figura 2.3).

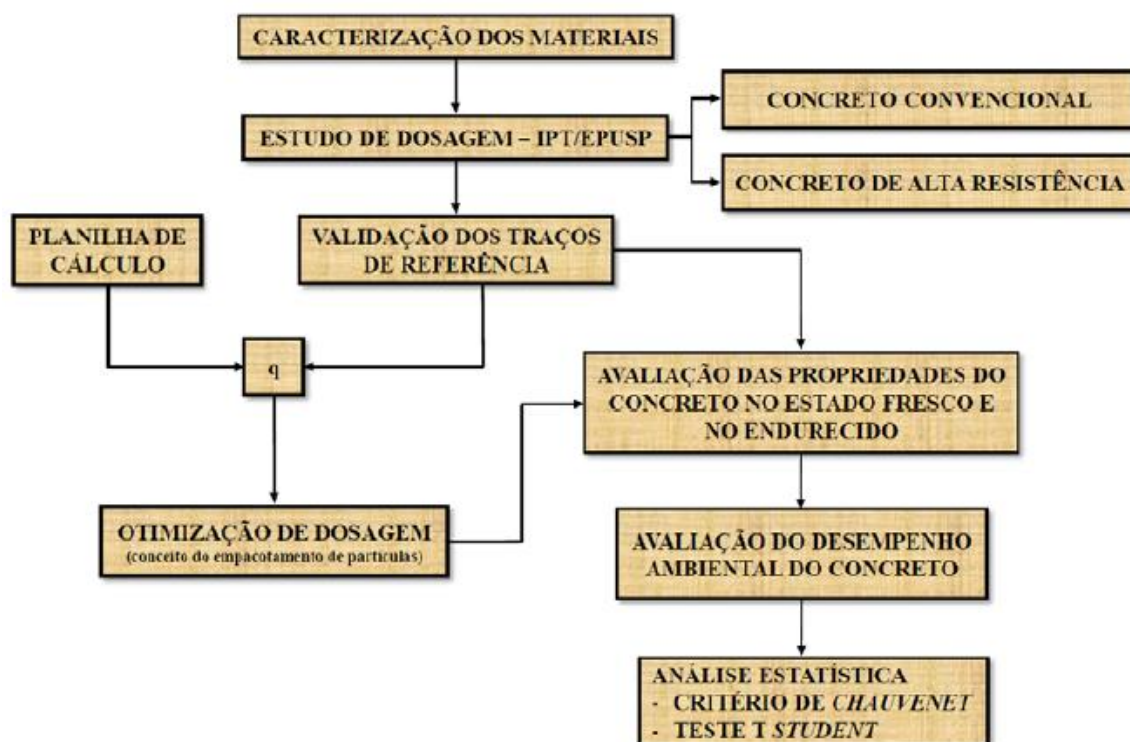


Figura 2.3 - Fluxograma de processos. [31]

Os materiais utilizados para elaboração do betão foram: cimento portland (CPII Z 32), agregado miúdo (areia media e fina de quartzo), agregado graúdo (brita basáltica 1/0/pedrisco), Sílica ativa, aditivo químico (Superplastificante ADVA CAST 525 - GCP) e água.

Para a elaboração dos traços de referência, Lopes (2019) utilizou o método tradicional IPT/EPUSP, método simples e comumente utilizado no setor da construção civil no Brasil. Alguns fatores foram fixados para elaboração dos traços de referência como o teor de argamassa (53%) e o teor de água/materiais secos (H – 8,5%) e teor de argamassa (63%) e teor de água/materiais secos (6,7%) para os traços convencionais e de alta resistência respectivamente.

Para cada traço foram moldados 27 corpos de prova cilíndrico 100 x 200 mm para que os ensaios propostos na Figura 2.4 fossem feitos.

Propriedade	Corpos de prova		
	Tipo	Dimensões (mm)	Quantidade
Resistência à compressão	Cilíndrico	100 x 200	15
Massa específica, absorção e índice de vazios	Cilíndrico	100 x 200	6
Absorção por capilaridade	Cilíndrico	100 x 200	6
Módulo de elasticidade dinâmico	Prismático	150 x 150 x 500	3
Velocidade de pulso ultrassônico	Prismático	150 x 150 x 500	3
Resistência à tração na flexão	Prismático	150 x 150 x 500	3

Figura 2.4 – Tabela com divisão dos corpos de prova para os ensaios. [31]

Após a definição dos traços e quantidade de corpos de prova Lopes (2019) apresenta a caracterização dos materiais, representados pelas Figuras 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8.

Propriedade	Cimento	Sílica ativa	Areia fina	Areia média	Pedrisco	Brita 0	Brita 1
Massa específica (g/cm ³)	3,05	2,21	2,58	2,57	2,84	2,99	2,96
Massa unitária (g/cm ³)	-	-	1,56	1,50	1,68	1,51	1,50
Área superficial específica - Blaine (cm ² /g)	3960	17900	-	-	-	-	-
Dimensão máxima característica (mm)	-	-	0,60	2,36	6,30	9,50	19,00
Absorção	-	-	0,15	0,63	2,11	-	1,64
Módulo de finura	-	-	1,20	2,40	3,40	5,90	6,60
Índice de forma	-	-	-	-	-	-	2,60

Figura 2.5 – Tabela com propriedades físicas dos materiais. [31]

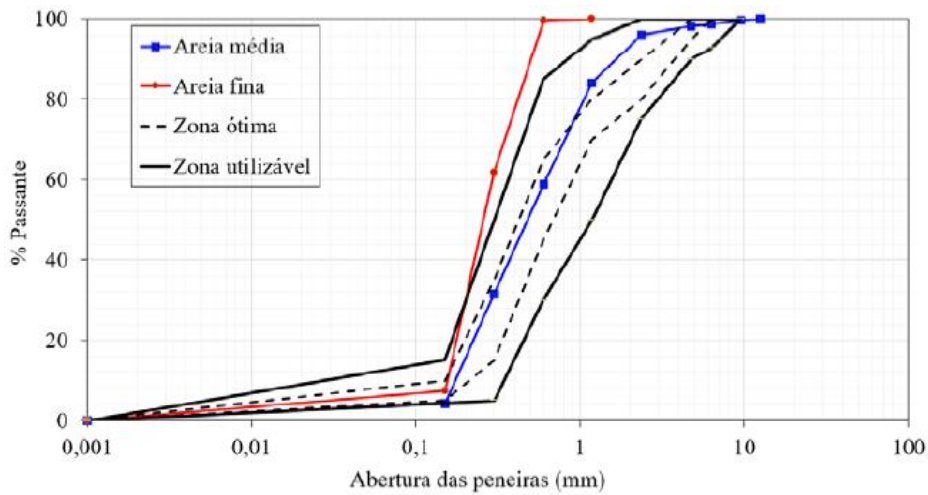


Figura 2.6 – Curvas de distribuição granulométrica (Agregados Miúdos). [31]

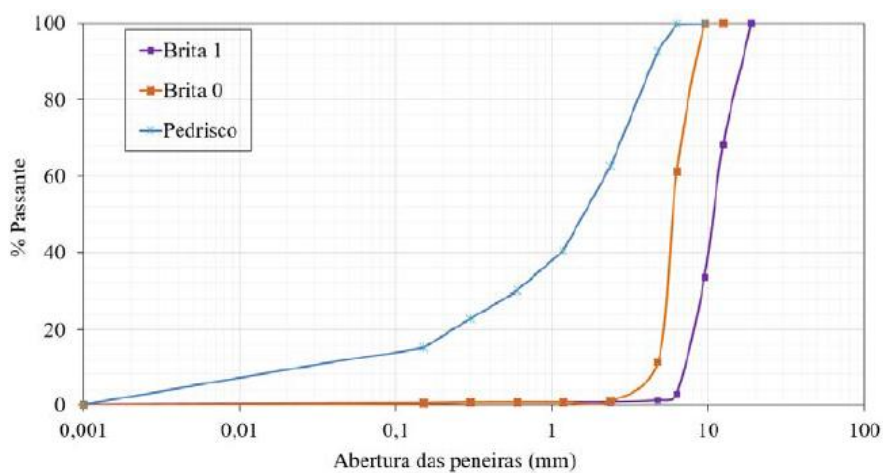


Figura 2.7 – Curvas de distribuição granulométrica (Agregados Graúdos). [31]

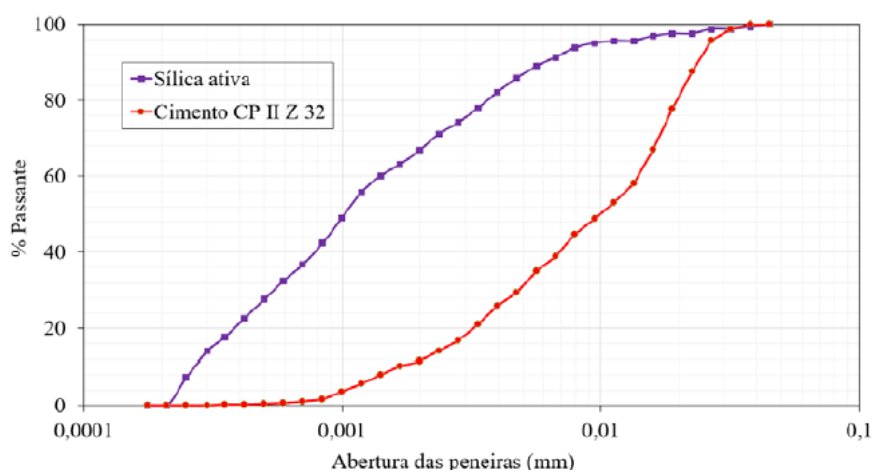


Figura 2.8 – Curvas de distribuição granulométrica a laser (Cimento e sílica ativa). [31]

Utilizando o método tradicional do IPT/EPUSP o Lopes (2019) chegou nas proporções apresentadas na Figura 2.9.

Identificação	C25-R	C40-R	C50-R	C80-R
Traço em massa	1: 2,60 : 3,20 : 0,58	1: 1,65 : 2,35 : 0,43	1: 2,53 : 2,07 : 0,42*	1: 1,21 : 1,30 : 0,26*
Consumo de materiais (kg/m³ de concreto)				
Cimento	332,16	453,77	375,06	607,35
Sílica ativa	-	-	30,97	50,16
Brita 1	1062,91	1066,35	862,64	877,29
Areia fina	345,45	299,49	421,74	326,62
Areia Média	518,17	449,23	632,61	489,93
Água	192,65	195,12	157,53	157,91
Aditivo Plastificante	0,80	1,23	-	-
Aditivo Superplastificante	-	-	4,43	4,98

Nota: (*) Sílica incorporada em substituição volumétrica ao cimento no teor de 10%.

Figura 2.9 – Tabela com composição dos betões de referência. [31]

Com as composições e proporções calculadas, através do *software excel* e o modelo de alfred foram construídas as curvas granulométricas dos traços exemplificada na Figura 2.10.

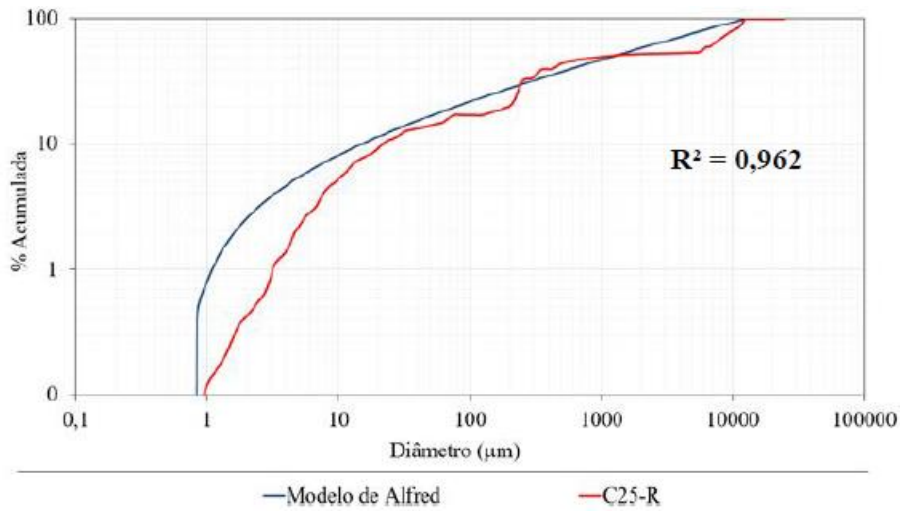


Figura 2.10 – Curva de distribuição granulométrica (C25-R). [31]

Após a execução das curvas para cada traço referência, um valor de coeficiente de distribuição (q) foi calculado para cada traço de referência. Com o auxílio da ferramenta *solver* presente no *software excel* foi feita a otimização dos traços de referência resultando em novas curvas de distribuição, como pode ser visto na Figura 2.11, onde está representado o traço C25-R otimizado.

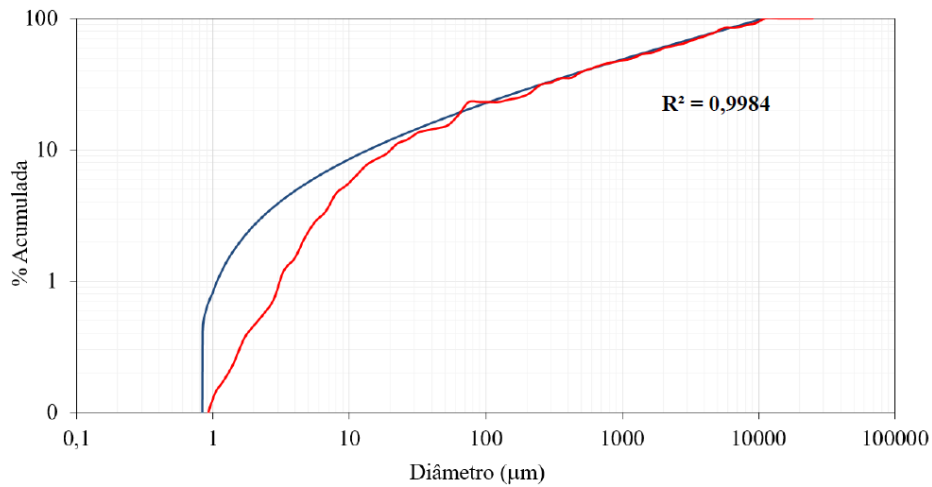


Figura 2.11 – Curva de distribuição granulométrica otimizada (C25-OT). [31]

A proporção dos materiais dos traços otimizados pode ser visto na Figura 2.12.

Identificação	C25-OT		C40-OT		C50-OT		C80-OT	
	Consumo (kg/m ³)	% em massa de material seco	Consumo (kg/m ³)	% em massa de material seco	Consumo (kg/m ³)	% em massa de material seco	Consumo (kg/m ³)	% em massa de material seco
Cimento	364,74	15,84	439,75	19,01	349,89	14,82	420,82	17,95
Sílica ativa	-	-	-	-	216,93	9,24	302,99	12,87
Brita 1	386,63	16,84	351,80	15,30	328,90	13,96	269,32	11,56
Brita 0	178,72	7,73	162,71	6,95	129,46	5,52	92,58	3,99
Areia fina	-	-	-	-	-	-	29,46	1,18
Areia Média	412,16	17,85	444,14	19,24	444,36	18,88	429,23	18,39
Pedrisco	959,28	41,73	914,67	39,50	888,72	37,58	799,55	34,05
Água	196,96	-	197,89	-	157,45	-	155,70	-
Aditivo Plastificante	4,38	-	5,28	-	-	-	-	-
Aditivo Superplastificante	-	-	-	-	9,80	-	13,05	-

Figura 2.12 – Tabela proporção dos materiais particulados dos betões otimizados. [31]

Com os traços definidos, os corpos de prova foram moldados e ensaiados. A seguir serão apresentados os resultados referente à resistência a compressão dos corpos de prova (Figura 2.13 e 2.14).

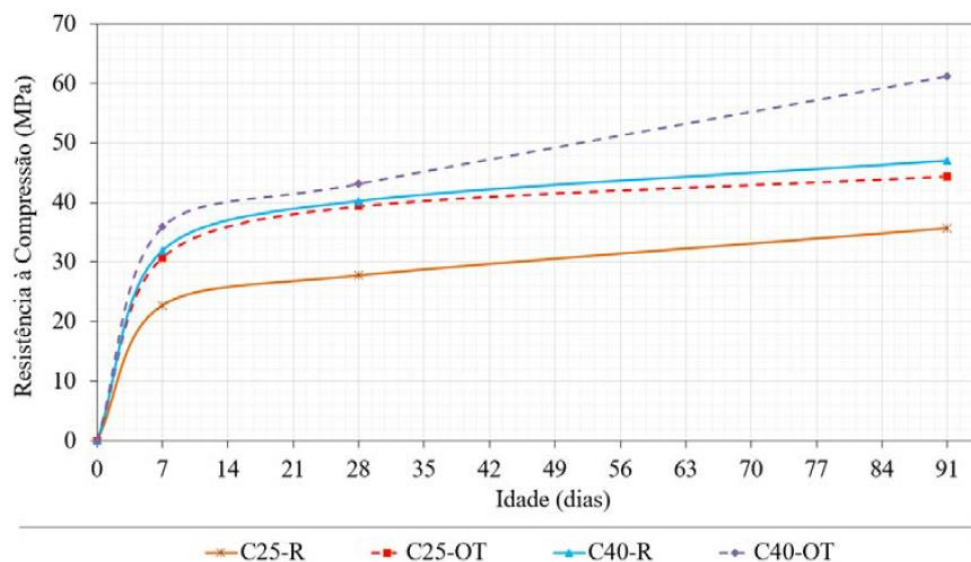


Figura 2.13 – Evolução da resistência média à compressão dos betões convencionais. [31]

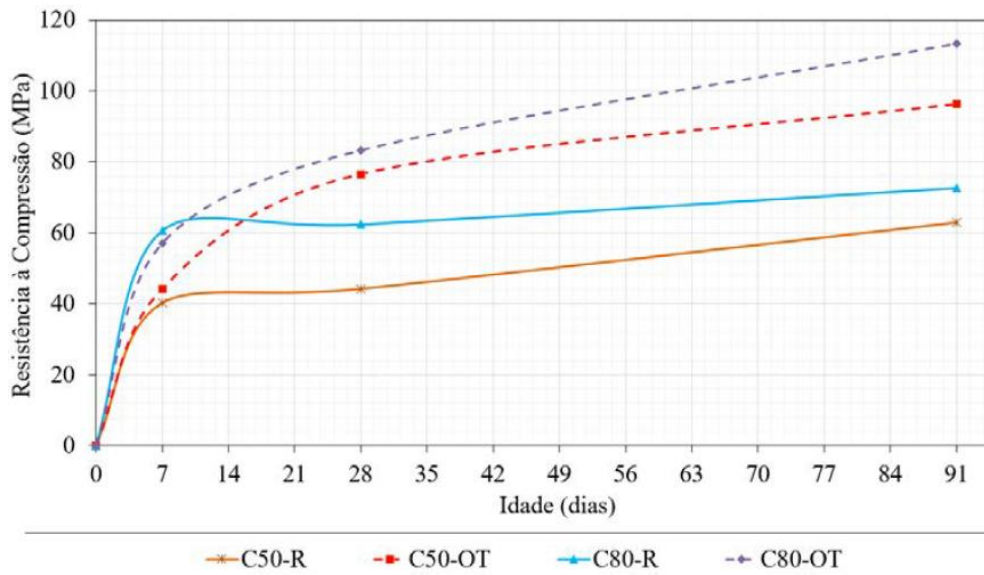


Figura 2.14 – Evolução da resistência média à compressão dos betões de alta resistência. [31]

Com base nos resultados obtidos, pode-se verificar um aumento considerável nos traços otimizados através do E.P. baseado no modelo de Alfred.

2.3.4 Modelos de protótipos para painéis de betão

Estudos voltados ao desenvolvimento de elementos pré-fabricados apresentam uma grande dificuldade quando limitações como espaço para produção e manejo são colocados. Portanto, um dos meios para remediar essas condições é produzir protótipos para análise tanto estrutural como comportamental.

Lourensini (2017) propôs em sua pesquisa a elaboração de protótipos de painel pré-fabricado de composição mista ou maciça, sendo o painel maciço composto por uma tela e o betão dosado, enquanto que os demais foram elaborados de forma mista (sanduíche) sendo sua divisão feita com camadas de tela nas extremidades, placas de poliestireno expandido (EPS) ou placas de poliuretano expandido (PU) e betão.

Para moldagem dos protótipos foram dosados traços de betão seguindo os seguintes parâmetros: cobertura de 15 mm, resistência a compressão de 25 MPa e relação água/cimento (a/c) menor ou igual a 0,45. Portanto, a partir dessas premissas apresentadas os seguintes traços foram dosados (Tabela 2.1)

Tabela 2.1 – Traços dosados para moldagem dos protótipos. [32]

Traço	T1 (1:1:2)	T2 (1:1,5:3)	T3 (1:2:2,5)
Cimento	CP V-ARI	CP V-ARI	CP V-ARI
Areia	Média	Média	Média
Brita	1	0	0
a/c	0,45	0,50	0,50

A partir dos traços apresentados foram moldados os protótipos maciço e mistos (Figura 2.15).



Figura 2.15 – Painél maciço. [32]



Figura 2.16 – Painél com placa de poliuretano. [32]



Figura 2.17 – Painél com poliestireno expandido. [32]

CAPÍTULO 2

Os protótipos foram submetidos ao ensaio de resistência a tração na flexão conforme apresentado na Figura (2.18).



Figura 2.18 – Ensaio de tração na flexão. [32]

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

O presente trabalho apresenta uma sequência metodológica baseada, inicialmente, na caracterização dos materiais a serem utilizados para elaboração dos betões que serão utilizados como *in put* de dados para elaboração das curvas granulométricas dos traços.

Em seguida, está apresentado o processo para elaboração (moldagem) dos corpos de prova (cilíndricos e protótipos) que serão submetidos aos ensaios físicos e mecânicos apresentados abaixo, separados em ensaios no estado fresco e endurecido.

Por fim, a última etapa do estudo contempla uma breve análise estrutural comparando o uso dos painéis elaborados quanto ao impacto causado em um pequeno edifício, através da aplicação das cargas resultantes das massas específicas de cada traço dosado, avaliando no fim características como taxa de aço utilizada no total da estrutura e seu impacto quanto a armadura de uma viga selecionada.

3.1 DOSAGEM DO BETÃO

Adotou-se o método proposto pelo modelo de Alfred para elaboração das curvas granulométricas dos traços de betão, sendo necessário para esse método dados como massa específica e composição granulométrica dos materiais constituintes.

Em seguida, foram calculadas as curvas de empacotamento para definição dos traços. Com essa informação definida, foram realizados os ensaios no estado fresco e a moldagem dos corpos de prova para, posteriormente, realizar os ensaios no estado endurecido. Apresenta-se na 3.1 a sequência dos passos adotados na dosagem do betão

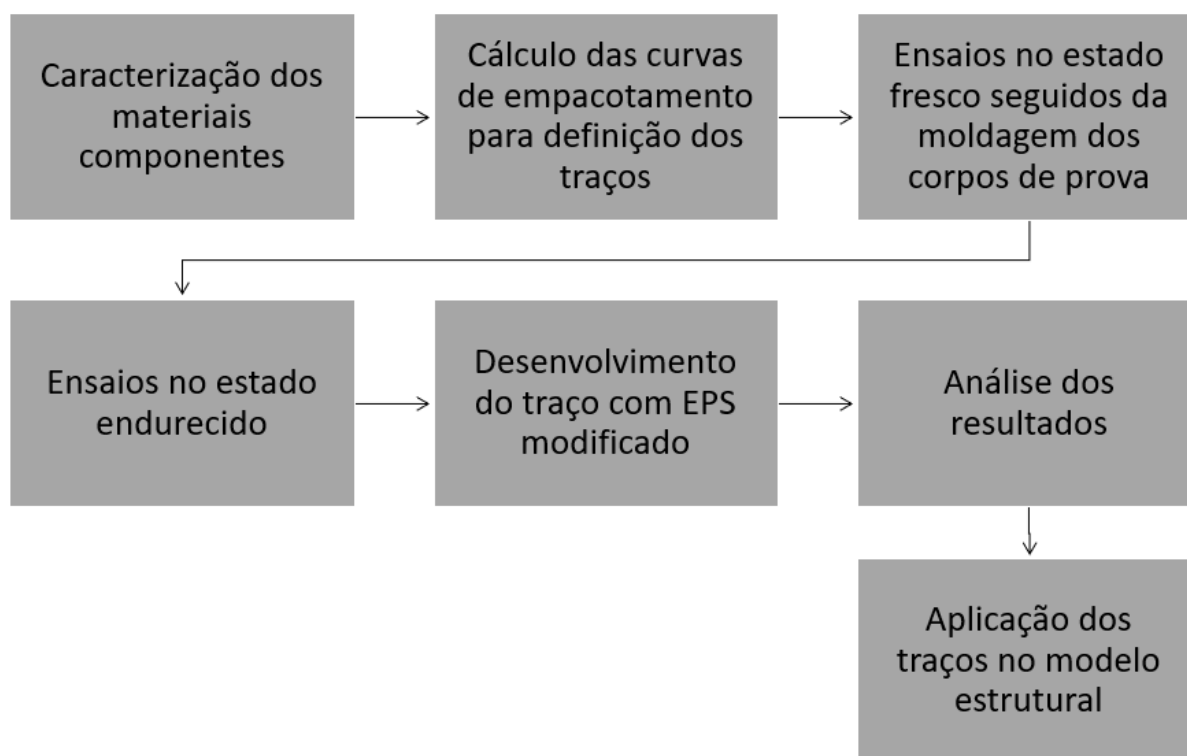


Figura 3.1 – Esquema seqüência da metodologia adotada

Os materiais utilizados para produção dos betões estão apresentados no Quadro 3.1 - Materiais utilizados na composição dos traços. Como agregados leves foram utilizadas esferas de argila expandida e de poliestieno expandido (EPS).

Tabela 3.1 – Quadro materiais utilizados na composição dos traços.

Material	Descrição/Fabricante
Cimento Portland	CP V – ARI Holcim
Areia natural	Areia quartzosa da cidade Bofete/SP
Brita 0	Brita de rocha granito
Argila expandida	Tipo 1506 Cinexpan
Poliestieno expandido (EPS)	Pérolas Isorecort
Água	Companhia de abastecimento
Aditivo superplastificante	Powerflow 4001 MC Bauchemie
Adesivo à base PVA	Murafan 38 MC Bauchemie
Aditivo redutor de água e retardador de início de pega	Muraplast FK 101 MC Bauchemie

3.1.1 Caracterização dos materiais

Para a dosagem dos traços, inicialmente foi feita a caracterização dos materiais, composto pela análise granulométrica dos agregados e ensaio de massa específica.

3.1.1.1 Areia

Para o ensaio de massa específica foi seguido o procedimento apresentado pela NBR NM 52. Através do ensaio realizado, o valor da massa específica da areia calculado foi de 2659,5 kg/m³.

O ensaio granulométrico foi realizado através do conjunto de peneiras com aberturas variando entre 9,5 mm e 0,150 mm. O resultado do ensaio pode ser visto nas Tabelas 3.2 e Figura 3.23

Tabela 3.2 – Ensaio granulométrico, areia rosa.

Areia Rosa						
Abertura das peneiras (mm)	Parcelas retidas (g)		Porcentagem retida		Média	Porcentagem retida acumulada
	1°	2°	1°	2°		
9,5	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4,75	3,23	0	0,64%	0,00%	0,32%	0,32%
2,36	1,06	1,55	0,21%	0,31%	0,26%	0,58%
1,18	1,84	1,64	0,37%	0,33%	0,35%	0,93%
0,6	21,98	24,06	4,39%	4,79%	4,59%	5,52%
0,3	153,3	152	30,60%	30,25%	30,43%	35,94%
0,15	236,18	238,58	47,15%	47,48%	47,31%	83,26%
< 0,150	83,31	84,67	16,63%	16,85%	16,74%	100,00%
Soma	500,9	502,5	100,00%	100,00%	100,00%	-

A partir do resultado apresentado acima a seguinte curva granulométrica foi traçada (Figura 3.3).

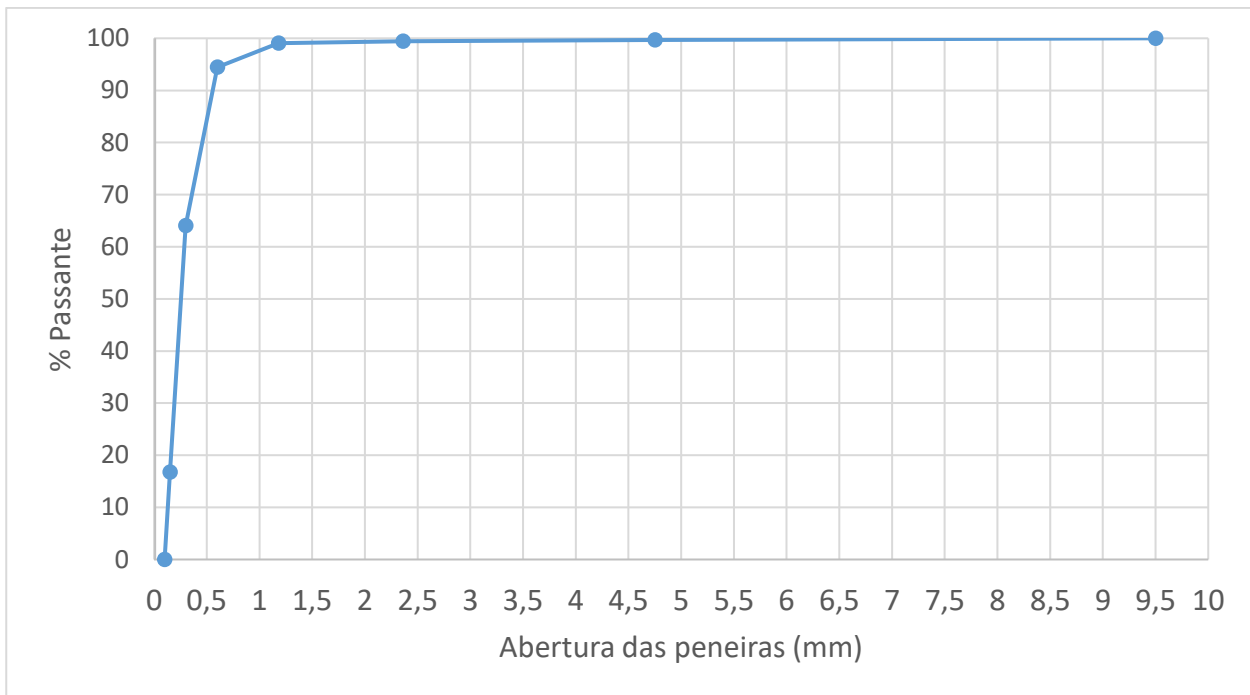


Figura 3.2 – Gráfico curva granulométrica, areia.

3.1.1.2 Brita

Para o ensaio de massa específica foi seguido o procedimento apresentado pela NBR NM 53. Através do ensaio realizado, o valor da massa específica da brita calculado foi de $2631,6 \text{ kg/m}^3$.

O ensaio granulométrico foi realizado através do conjunto de peneiras com aberturas variando entre 75 mm e 2,36 mm. O resultado do ensaio pode ser visto nas Tabelas 3.4 e Figura 3.4.

Tabela 3.3 – Ensaio granulométrico, brita.

Brita 0 (Pedrisco)						
Abertura das peneiras (mm)	Parcelas retidas (g)		Porcentagem retida		Média	Porcentagem retida acumulada
	1°	2°	1°	2°		
75	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
37,5	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
12,5	23,84	27,05	0,48%	0,54%	0,51%	0,51%
9,5	135,23	91,48	2,70%	1,84%	2,27%	2,78%
6,3	3091,87	3131,25	61,73%	62,96%	62,35%	65,13%
4,75	930,19	983,31	18,57%	19,77%	19,17%	84,30%
2,36	827,58	740,05	16,52%	14,88%	15,70%	100,00%
Soma	5008,71	4973,14	100,00%	100,00%	100,00%	-

A partir do resultado apresentado acima a seguinte curva granulométrica foi traçada (Figura 3.5).

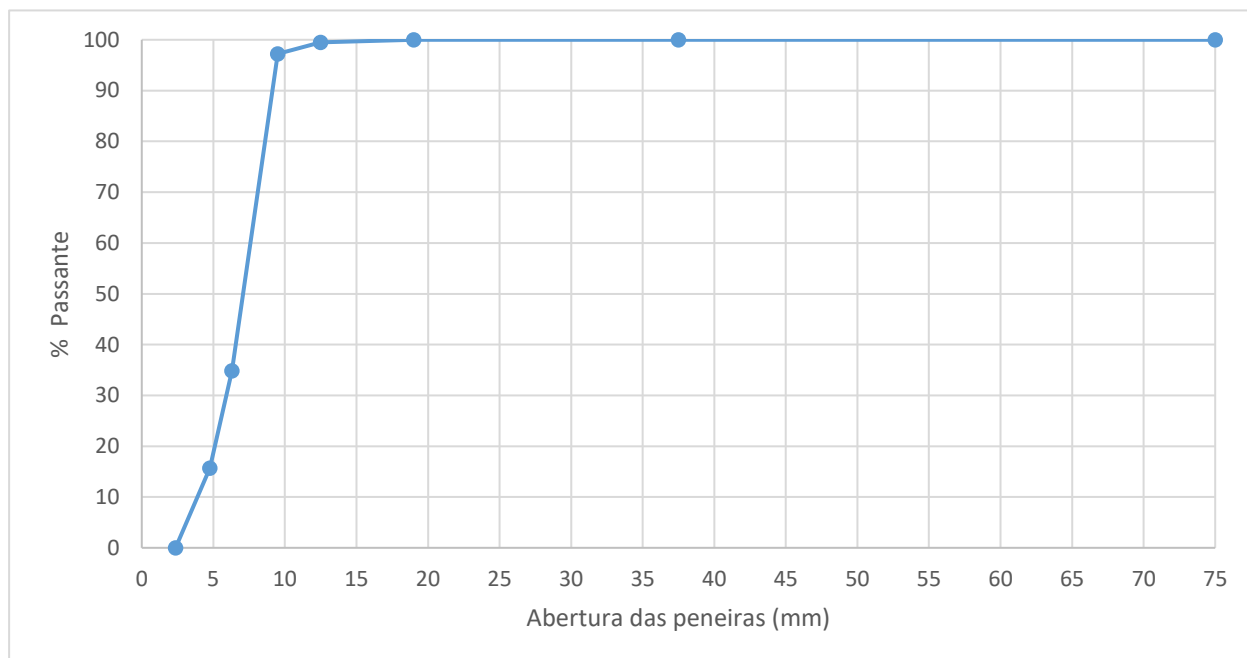


Figura 3.3 – Gráfico curva granulométrica, brita

3.1.1.3 Argila expandida

Fornecida pela distribuidora CINEXPAN, especializada em argilas expandidas com diversos tipos de granulometria diferentes. A argila escolhida, dentro do catálogo da distribuidora pode ser encontrada pelo código 1506. A seguir está apresentado a caracterização do material fornecida pela distribuidora.

PROPRIEDADES QUÍMICAS		PROPRIEDADES FÍSICAS	
Silício (em SiO ₂)	63,19%	Densidade aparente (kg/m ³)	600 ± 10%
Alumínio (em Al ₂ O ₃)	18,02%		
Ferro (em Fe ₂ O ₃)	7,63%	Massa Específica (g/dm ³)	0,82
Titânio (em TiO ₂)	0,92%		
Cálcio (em CaO)	0,64%	Classes granulométricas (mm)	6 - 15
Magnésio (em MgO)	3,26%		
Sódio (em Na ₂ O)	0,61%	Resistência mecânica	2,3 MPa ou 23,1 Kgf/ cm ²
Potássio (em K ₂ O)	4,91%		
Óxido de Fósforo (em P ₂ O ₅)	0,20%	Condutividade Térmica	0,10 a 0,16 W/(m.K)
Óxido de Manganês (em MnO)	0,08%		
Óxido de Bário (em BaO)	0,09%	Isolamento acústico	média 44 dB
Perda ao fogo	0,20%		

Figura 3.4 – Caracterização, argila expandida.

O ensaio granulométrico foi realizado através do conjunto de peneiras com aberturas variando entre 75 mm e 2,36 mm. O resultado do ensaio pode ser visto na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Ensaio granulométrico, argila expandida.

Argila Expandida			
Abertura das peneiras (mm)	Parcela retida (g)	Porcentagem retida	Pocentagem retida acumulada
75	0	0,00%	0,00%
37,5	0	0,00%	0,00%
19	0	0,00%	0,00%
12,5	1169,87	23,54%	23,54%
9,5	1483,64	29,86%	53,40%
6,3	1500,46	30,19%	83,59%
4,75	414,12	8,33%	91,92%
2,36	401,37	8,08%	100,00%
Soma	4969,46	100,00%	-

A partir do resultado apresentado acima a seguinte curva granulométrica foi traçada (Figura 3.7).

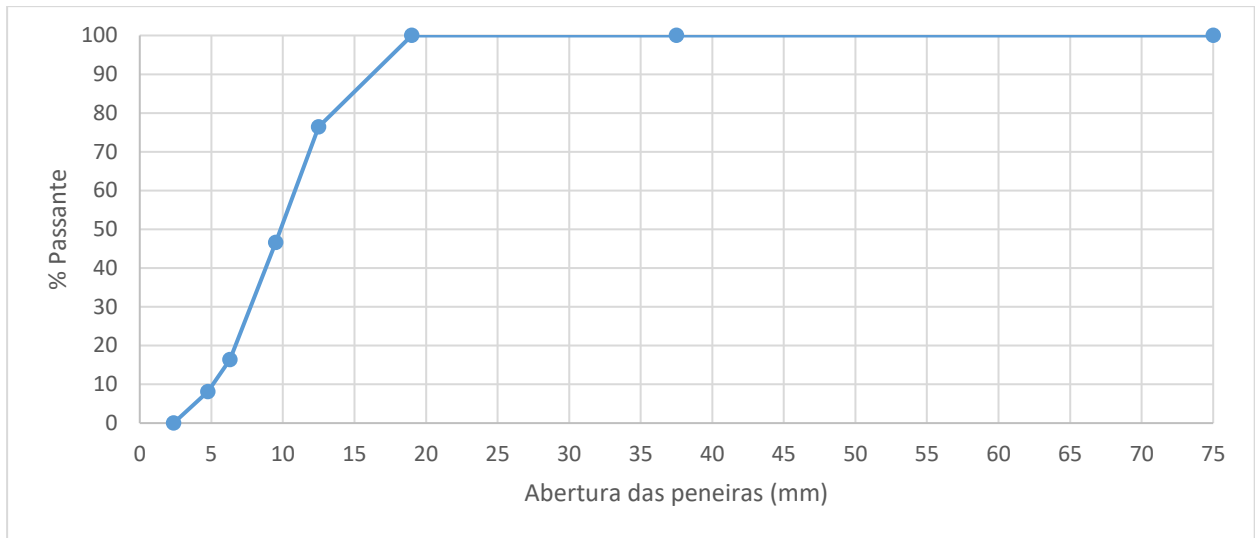


Figura 3.5 – Cuva granulométrica, argila expandida.

3.1.1.4 Cimento – CPV ARI

Para o cimento foi feito o ensaio de massa específica seguindo a norma NBR NM 23 [17], apresentado pelas Figuras 3.8 e 3.9. Através do ensaio, a massa específica do cimento encontrada foi de 3045,6 kg/m³.



Figura 3.6 – Foto ensaio de massa específica, cimento.

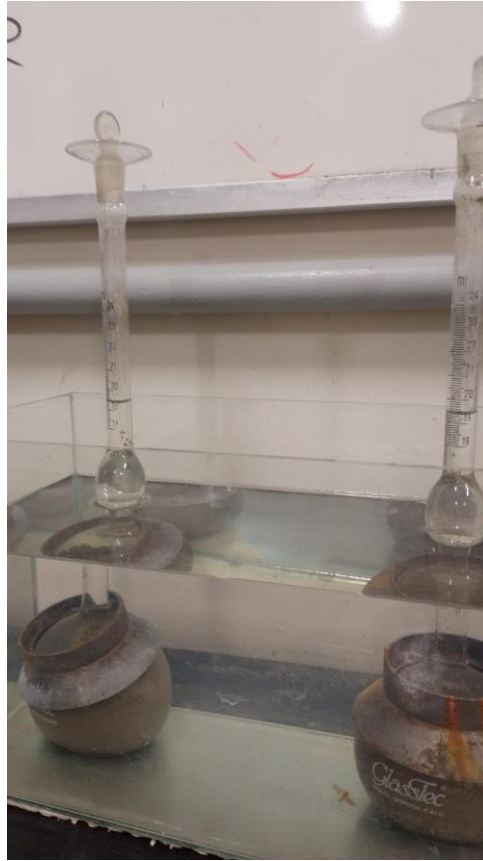


Figura 3.7 – Foto ensaio de massa específica, cimento.

Diferente dos agregados apresentados acima, por se tratar de um material com granulometria na casa dos nanômetros, o cimento não conseguiu ser analisado dentro do laboratório assim como os demais devido a necessidade de equipamentos especiais para fazer ensaios granulométricos por difusão a laser, indicados para ensaios granulométricos de materiais com essa faixa granulométrica. Portanto a curva granulométrica utilizada para elaboração dos traços foi, assim como a argila expandida, fornecida pela própria fabricante (Figura 3.10).

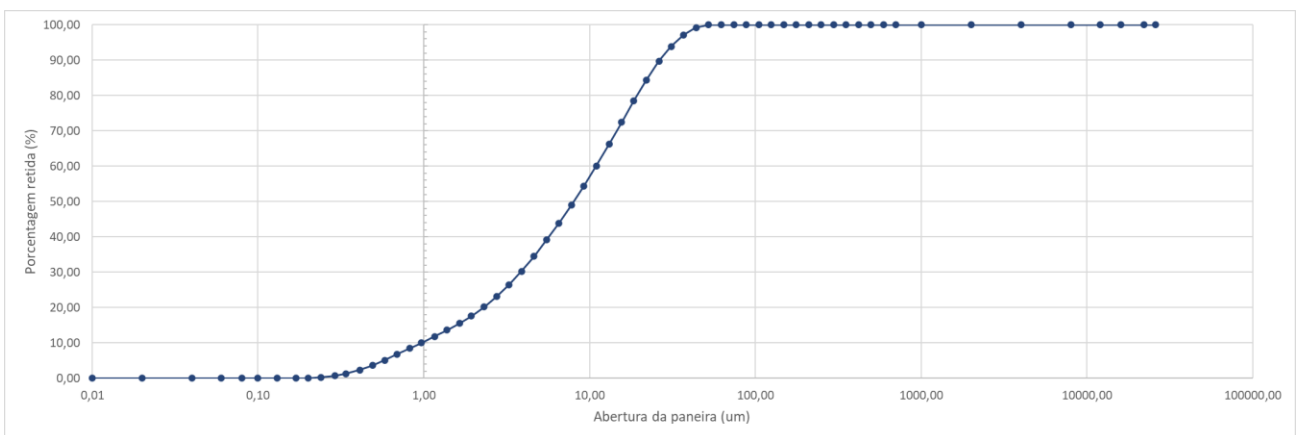


Figura 3.8 – Gráfico curva granulometrica CPV ARI HOLCIM.

3.1.1.5 Aditivos

Devido a exigência de propriedades físicas e mecânicas do betão, o uso de substâncias químicas como os aditivos se tornou uma obrigatoriedade para atingir as métricas estabelecidas pelo mercado.

Com o objetivo de atingir o desempenho e trabalhabilidade desejados, os traços dosados utilizaram pelo menos um dos três aditivos, fornecidos pela MC-Bauchemie, listados a seguir.

O primeiro, utilizado para ganho de resistência e trabalhabilidade do betão foi o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 4001 da fabricante MC-Bauchemie, classificado pela marca como aditivo redutor de água.

O segundo, Murafan 38 utilizado para auxiliar na viscosidade do traço, classificado pela fabricante como adesivo à base de PVA, foi escolhido com o objetivo de manter tanto a argila expandida como as esferas de poliestireno expandido contidas na argamassa.

O terceiro, Muraplast FK 101 também adotado para auxílio na viscosidade e trabalhabilidade do traço é classificado como aditivo redutor de água, foi utilizado somente no traço com EPS com o objetivo de evitar a segregação do material que já não conseguia ser contido somente com o uso do Murafan 38.

3.1.2 Construção das curvas granulométricas

Como apresentado no item 3.1, a dosagem dos traços de betão foram feito através da aplicação do modelo de alfred. O estudo realizado por Goes *et al.* (2020) apresenta um quadro no qual os autores compilaram diversos trabalhos, onde diferentes valores para o coeficiente de distribuição “q” são apresentados, como pode ser visto na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Coficientes de distribuição q.

Referência	Coeficiente (q)	Resistência à Compressão (MPa)
Li; Yu; Brouwers (2018)	0,22	110 a 142
Yu <i>et al.</i> (2014)	0,23	70 a 115
Yu; Spiez; Brouwers (2014b)		142
Yu; Spiez; Brouwers (2014c)		100 a 140
Yu <i>et al.</i> (2016)		135
Yu; Spiesz; Brouwers (2014a)		91 a 142
Yu; Spiesz; Brouwers (2016)		102 a 118
Yu <i>et al.</i> (2017)		150 a 155
Song <i>et al.</i> (2018)		120 a 160
Kumar <i>et al.</i> (2020)	0,10 a 0,20	

Através dos dados apresentados acima, por apresentar mais estudos e resultados acima do esperado, o valor adotado para o coeficiente de distribuição foi de 0,23. Com o auxílio da ferramenta *solver* presente no software *excel* foi elaborado uma curva considerada ideal para esse valor de “q”, ou seja, com a melhor distribuição granulométrica possível (Figura 3.11).

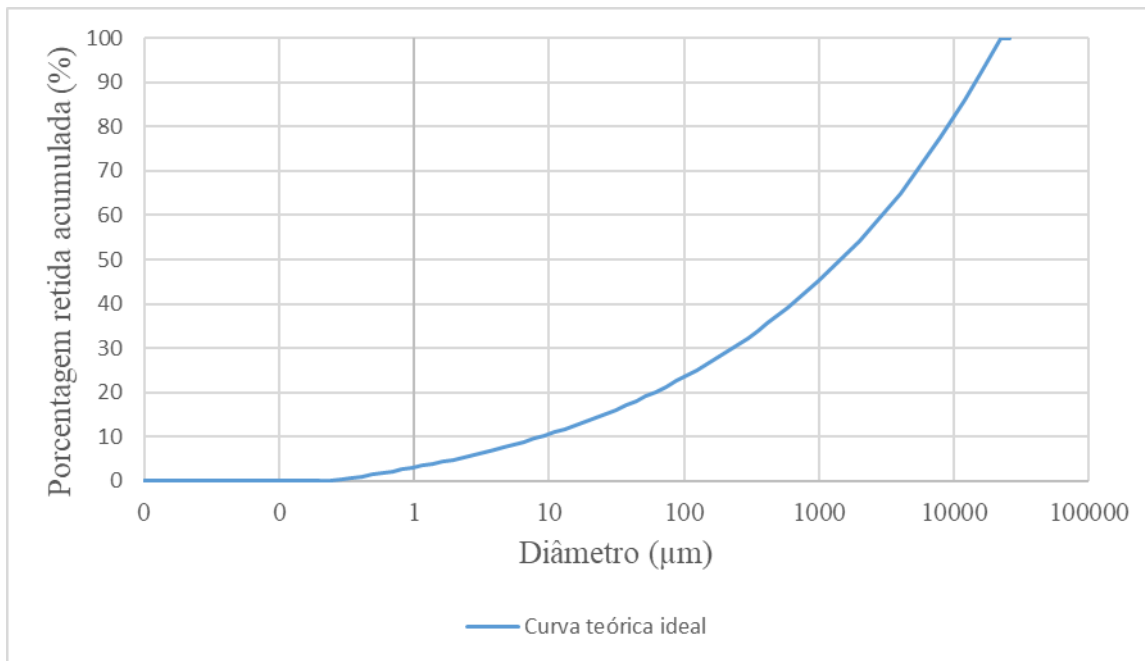


Figura 3.9 – Gráfico curva granulométrica ideal ($q = 0,23$).

Com o auxílio do *software* Elkem Materials Mixture Analyser (EMMA), os dados obtidos pelos ensaios granulométricos apresentados anteriormente foram interpolados com o objetivo de melhorar a distribuição granulométrica dos materiais, onde através do procedimento de cálculo executado pelo software uma maior quantidade de aberturas pode ser utilizada para elaboração do empacotamento.

As Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 a seguir apresentam os resultados fornecidos pelo *software* após o *in put* dos dados apresentados no item 3.1.1, com a sequência apresentada sendo areia, brita e argila expandida seguindo a ordem já apresentada, os resultados dos ensaios estão apresentados a esquerda da figura, enquanto que no centro estão apresentados os dados já interpolados.

EMMA

Material Library

Please edit specifications to your materials. You can also import from external datasets og consolidate libraries

Material: **Areia Rosa**

Details for material

Material Name: Areia Rosa

Description:

Origin:

Price: Per Metric Ton (MT)

Part. Density:

Part. Porosity: %

CO2/kg: gram/kg

KJ/kg:

d50: N/A

Last Modified: 07/09/2022 19:26:44

Distribution Data

Size (micron)	Percentage Pass
64000,00	100,00
32000,00	100,00
26000,00	100,00
22000,00	100,00
16000,00	100,00
12000,00	100,00
8000,00	99,90
4000,00	99,60
2000,00	99,31
1000,00	97,65
704,00	95,30
592,00	93,67
497,80	84,12
418,60	76,09
352,00	69,33
296,00	62,80
248,90	47,94
209,30	35,45
176,00	24,94
148,00	16,07
124,50	8,20
104,70	1,57
88,00	0,00
74,00	0,00
62,20	0,00
52,30	0,00
44,00	0,00
37,00	0,00
31,10	0,00
26,20	0,00
22,00	0,00
18,50	0,00
15,60	0,00
13,10	0,00
11,00	0,00
9,25	0,00
7,78	0,00
6,54	0,00
5,50	0,00
4,62	0,00
3,89	0,00
3,27	0,00

You can import material distribution data via the clipboard. Press the button 'Import Materials' for more info.

Fill in Size and Percentag Pass values, and press the button on the right to interpolate

Size (micron)	Percentage Pass
9500,00	100,00
4750,00	99,68
2360,00	99,42
1180,00	99,07
600,00	94,48
300,00	64,06
150,00	16,74
100	0,00
0,00	0,00

Figura 3.10 – Granulometria interpolada, areia.

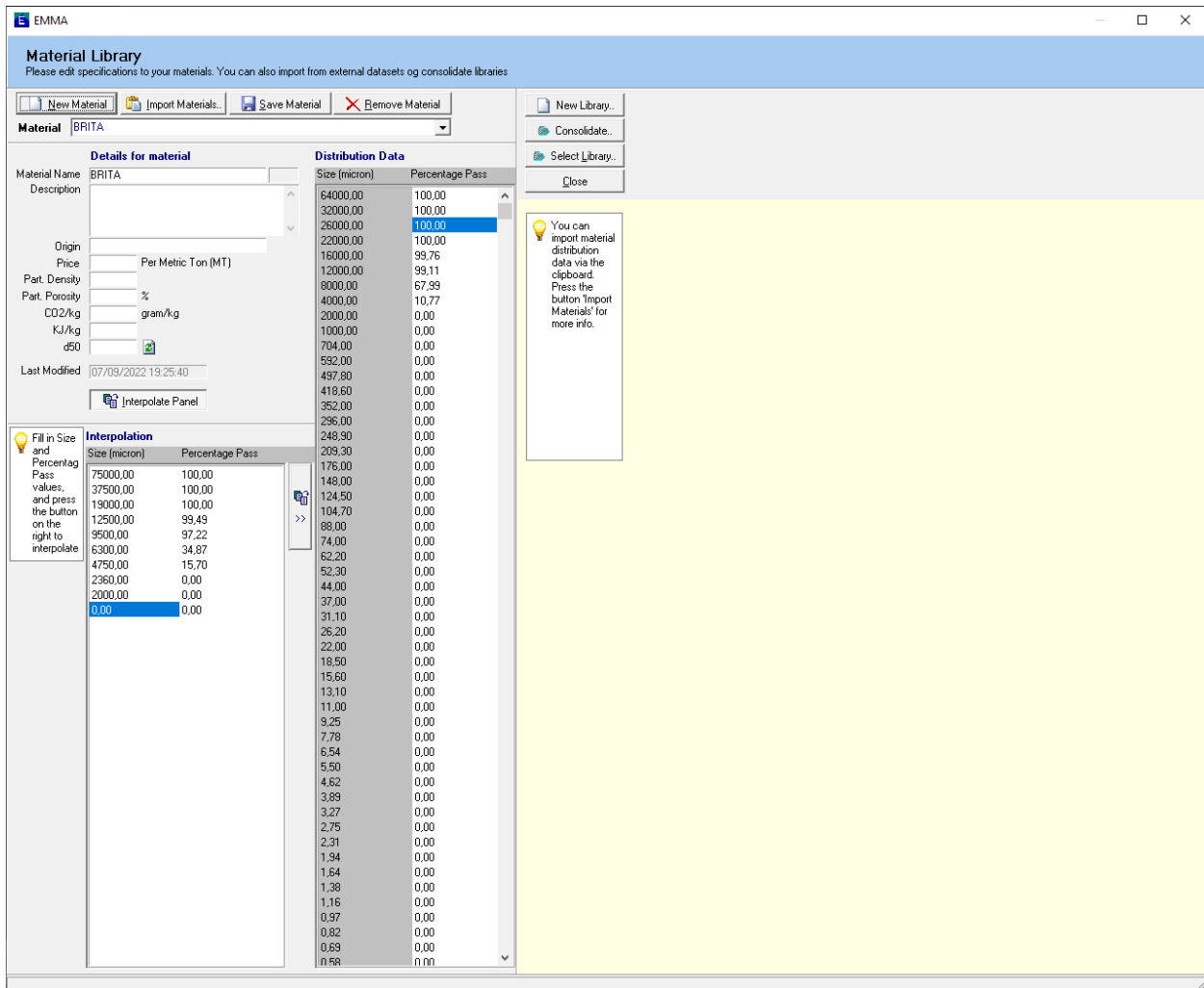


Figura 3.11 – Granulometria interpolada, brita.

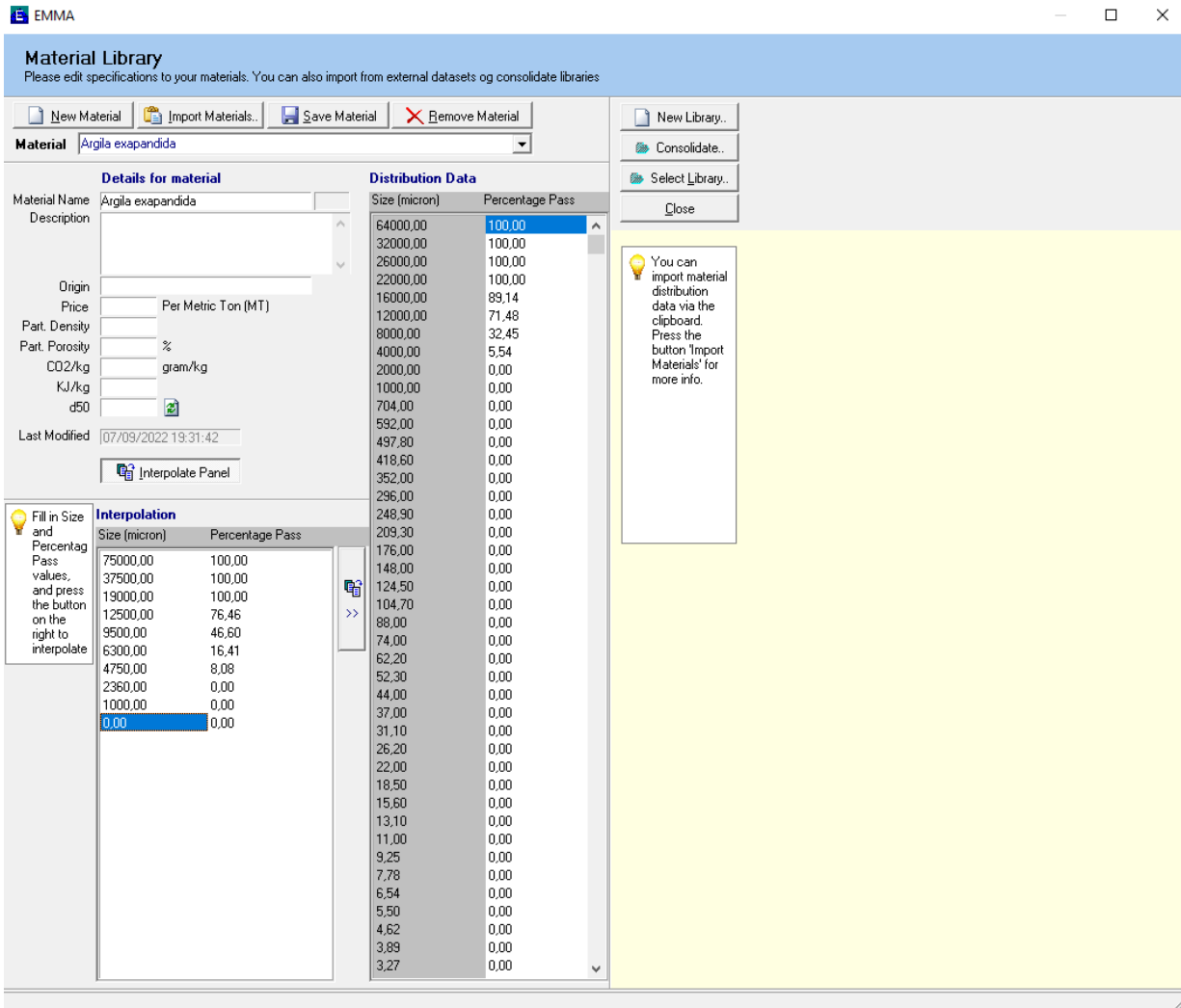


Figura 3.12 – Granulometria interpolada, argila expandida.

Com os dados obtidos pela interpolação dos agregados, novas curvas granulométricas foram traçadas e estão apresentadas na Figura 3.15 a seguir.

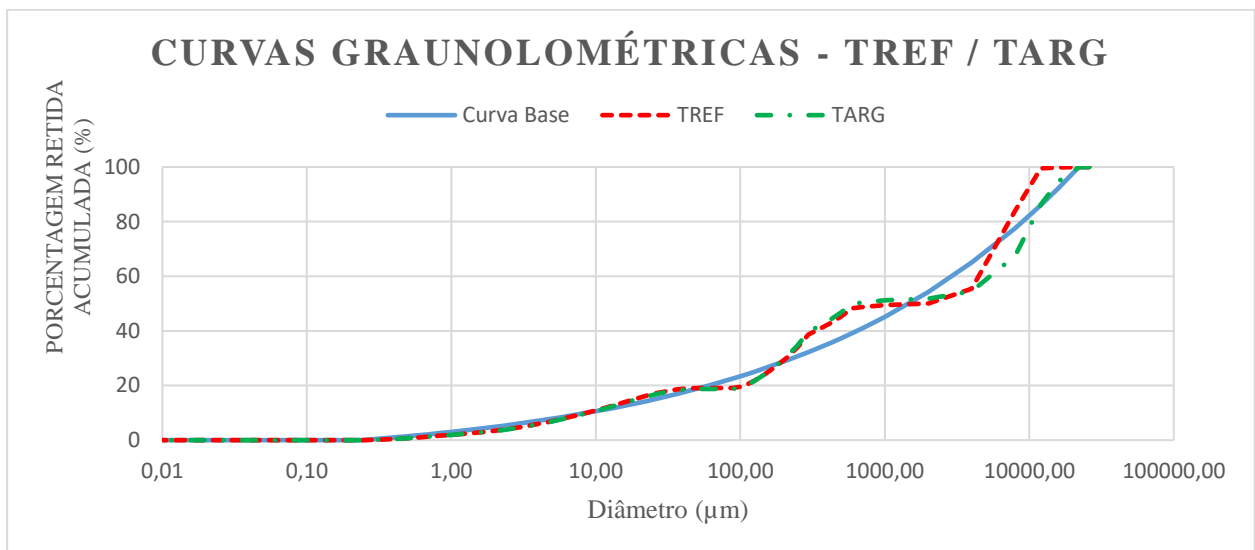


Figura 3.13 - Gráfico curvas granulométricas dos materiais interpolados.

3.2 CURVAS GRANULOMÉTRICAS CALCULADAS

A partir dos dados obtidos pela caracterização dos materiais foram elaboradas duas curvas granulométricas, através da ferramenta *solver* presente no *software excel*, sendo uma correspondente a um traço com brita (TREF) e outro com argila expandida (TARG), enquanto que o traço com EPS, devido a sua distribuição granulométrica, utilizou como referência a curva granulométrica do T_{ARG} substituindo em volume a quantidade de agregado.

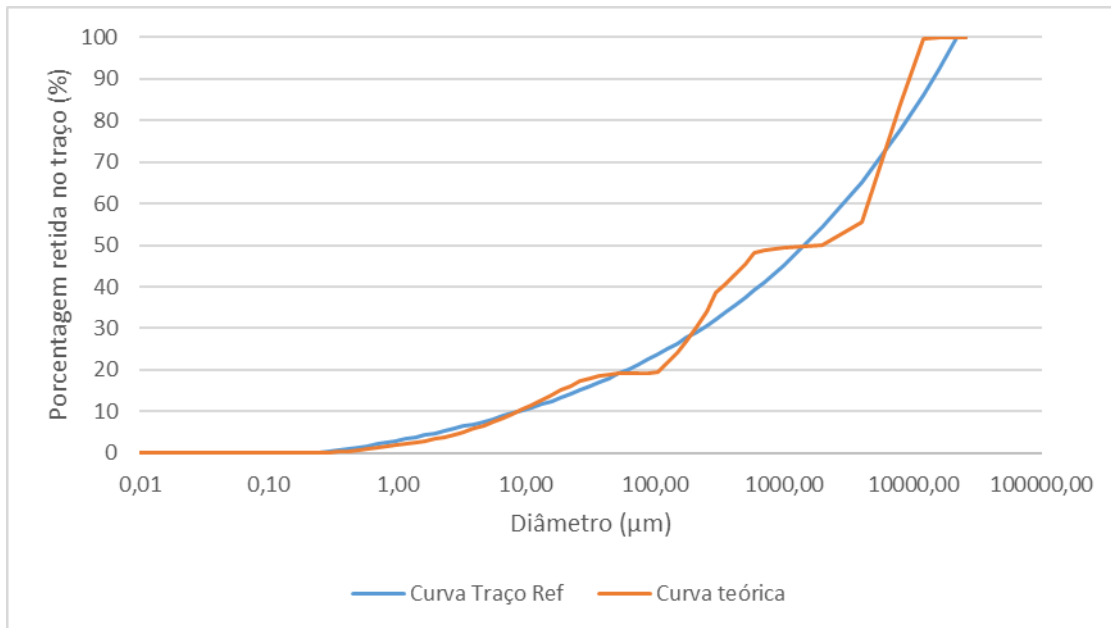


Figura 3.14 – Gráfico curva granulométrica, traço com brita.

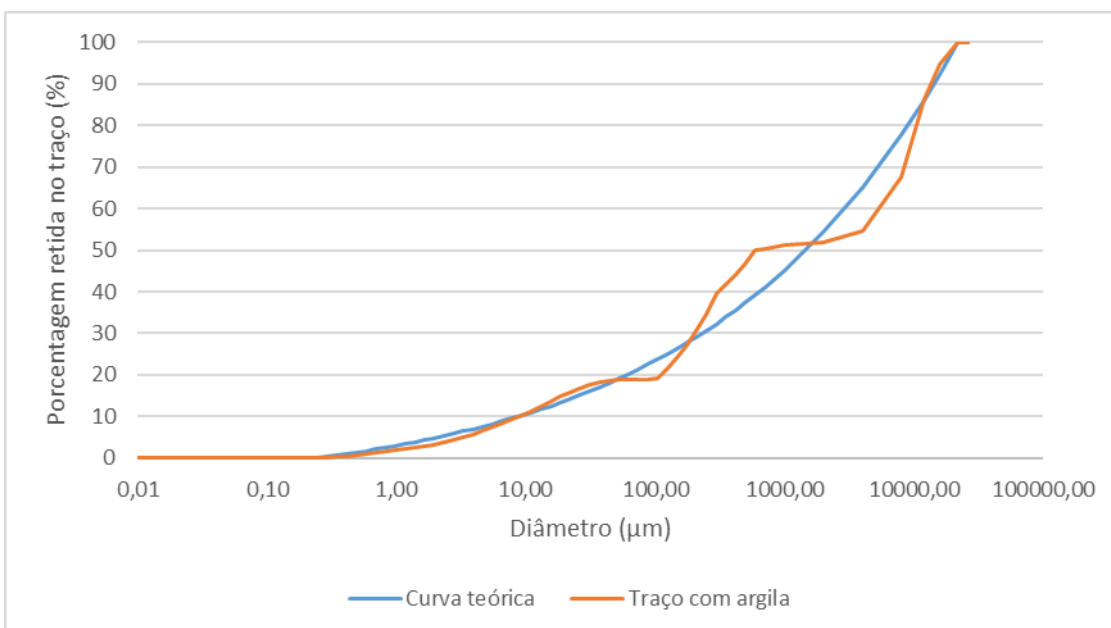


Figura 3.15 – Gráfico curva granulométrica, traço com argila.

Através das curvas apresentadas acima os seguintes traços unitários foram elaborados:

Tabela 3.6 – Traços unitários

Traços unitários			
Material/Traço	TREF	TARG	TEPS
Cimento - CPV ARI	1	1	1
Superplastificante - Powerflow 4001	0,01	0,01	0,01
Murafan 38	-	0,01	0,01
Muraplast FK 101	-	-	-
Água	0,3	0,3	0,3
Areia Fina	1,393	1,518	1,518
Pedrisco (Brita 0)	2,209	-	-
Argila Expandida	-	0,676	-
Esfera de Poliestieno Expandido	-	-	0,02

3.3 CORPOS DE PROVA

Para cada traço foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos com dimensão 100 x 200 mm e 4 protótipos de painéis com dimensão 100 x 200 x 400 mm, moldados em formas produzidas com placas de MDF (*Medium Density Fiberboard*), apresentados nas Figura 3.18 e Figura 3.19. As dimensões dos protótipos foram baseadas no estudo de Lourensini (2017), que produziu protótipos de painéis pré-fabricados com placas de poliestireno e poliuretano compondo parte da estrutura. Nas Figuras 3.20, 3.21 e 3.22 estão apresentados protótipos após a desforma de cada traço.

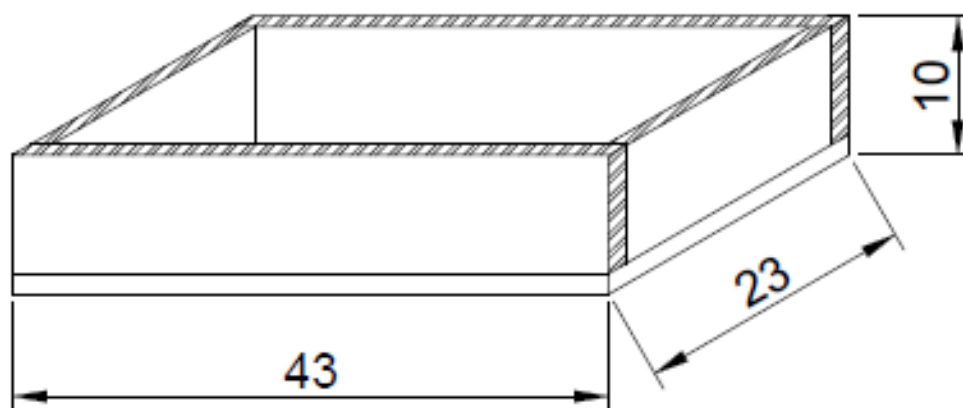


Figura 3.16 – Desenho esquemático da forma protótipo



Figura 3.17 – Foto forma protótipo de painel em madeira



Figura 3.18 – Foto CP's TREF.



Figura 3.19 – Foto CP's TARG.



Figura 3.20 – Foto CP's TEPS1.

3.4 ENSAIOS ESTADO FRESCO

Devido ao método de dosagem adotado nessa pesquisa, não era possível saber se o material apresentaria abatimento ou espalhamento, se comportando como betão autoadensável (CAA), até o momento do ensaio efetivamente. Inicialmente, portanto, seriam realizados ensaios de abatimento conforme indicado na NBR 16889 [16].

No momento das moldagens, os betões apresentaram alta fluidez e optou-se por realizar ensaio de espalhamento e por avaliar o índice de estabilidade visual (IEV), conforme precronizado pela norma NBR 15823-2 [14]. Além disso, foram realizados ensaios de massa específica no estado fresco conforme a NBR 9833 [8].

Para análise e caracterização dos traços no estado fresco foram adotadas as classes de espalhamento e IEV apresentadas na norma de betão autoadensável, NBR 15823-1 [13], expostas nas Tabelas 3.8 e 3.9.

Tabela 3.7 – Classes de espalhamento do CAA e aplicações (adaptado).

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação típica
SF1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armaduras ou que requerem curta distância de deslocamento
SF2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações
SF3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura ou com forma arquitetônica complexa

Tabela 3.8 – Classes de índice de estabilidade visual do CAA (adaptado).

Classe	Descrição
IEV 0	Sem evidência de segregação ou exsudação
IEV 1	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2	Presença de pequena auréola de argamassa e/ou empilhamento de agregados no centro do betão
IEV 3	Segregação claramente evidenciada

3.5 ENSAIOS ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios realizados no estado endurecido, bem como as respectivas normas, quantidades de amostras e idades de ensaios estão apresentados na Tabela 3.6. Todos os ensaios foram realizados utilizando a prensa da marca Instron apresentada na Figura 3.26.

Tabela 3.9 – Ensaios no estado endurecido.

Ensaio	Norma	Quantidade de amostras	Idade
Resistência à compressão	NBR 5739 (ABNT, 2018)	3/idade	7 dias 28 dias
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)	3/idade	7 dias 28 dias
Resistência à tração na flexão	NBR 12142 (ABNT, 2010)	2/idade	28 dias
Velocidade de propagação de onda ultrassônica	NBR 8802 (ABNT, 2019)	8/idade(1)	28 dias
Módulo de elasticidade dinâmico	C597 (ASTM, 2022)	8/idade(1)	28 dias

Os mesmos utilizados nos ensaios de resistência à compressão, tração diametral e tração na flexão



Figura 3.21 – Foto prensa Instron.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com base na norma NBR 12142 [10]. Porém, foram adotadas modificações para realizar o ensaio no protótipo dos painéis e não em prismas, conforme orientado pela norma mencionada. O ensaio é realizado posicionando a amostra em dois apoios articulados. O espaçamento entre a extremidade da amostra e o apoio deve ser maior ou igual a 25 mm. Na parte superior, são aplicados dois pontos de carga, conforme pode ser observado na enquanto que a placa superior posiciona os apoios centralizado sob duas dimensões pré-definidas.

O presente estudo adotou dimensões iguais ao estudo de Lourensini (2017) para que fosse possível comparar os resultados obtidos pelo autor, assim como verificar o comportamento do betão quando utilizados moldes com superfícies maiores do que os prismas recomendados pela NBR 5738 [3]. Apresenta-se na Figura 3.27 na o ensaio de tração na flexão realizado no protótipo do painel.



Figura 3.22 - Foto ensaio de tração na flexão.

3.6 ANÁLISE ESTRUTURAL

Para verificar o impacto do uso de painéis executados com os betões dosados no presente estudo, foi utilizado um modelo estrutural de um edifício de 10 pavimentos (Figura 3.23) elaborado com o software TQS, desenvolvido para elaborar modelos de edificações contemplando desde sua fundação até sua cobertura, dentre as funcionalidades do programa as principais são: Concepção Estrutural, Análise Estrutural, Armaduras, Desenhos e plotagem. A planta do pavimento tipo, foco do presente estudo, está apresentada no Anexo A.

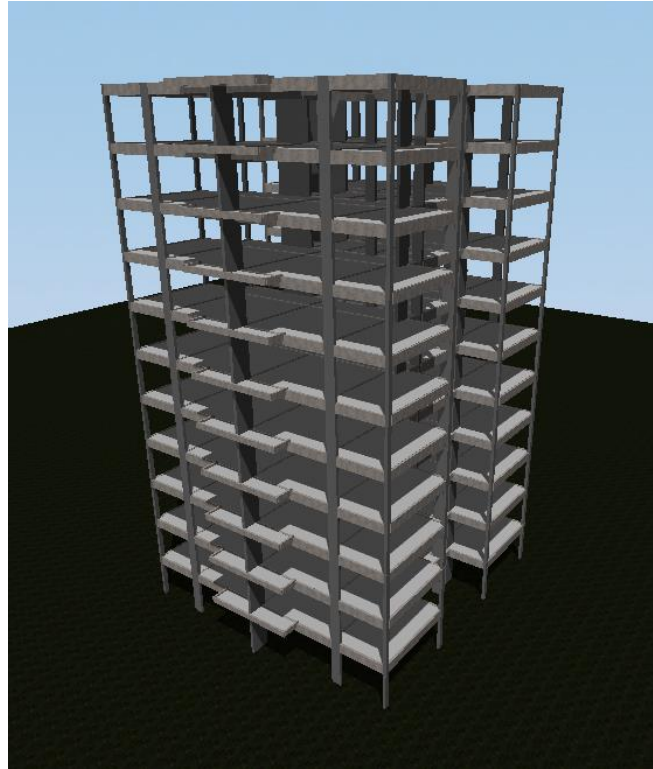


Figura 3.23 – Modelo estrutural.

O principal objetivo estabelecido para o uso do modelo estrutural é avaliar o impacto que os diferentes tipos de betão dosados podem causar acima de uma estrutura. Portanto, através das diferentes massas específicas que cada traço apresenta serão realizadas análises baseadas nos resultados que o software apresentar, como por exemplo a taxa de aço total utilizada.

O presente trabalho utilizará todas as ferramentas citadas de forma simples, apresentando resumidamente os resultados apresentados pelo próprio software, como os esforços resultantes do carregamento apresentado pelos protótipos estudados, assim como a armadura mínima resultante dos diferentes carregamentos.

3.6.1 Modelo TQS

O modelo estrutural utilizou como premissas os parâmetros apresentados pela ABNT NBR 6118:2014 e a versão do software utilizada foi a de número V23.9.20. A seguir estarão apresentados os parâmetros de projeto adotado no modelo estrutural utilizado para a elaboração do presente estudo. Os diferentes tipos de protótipos de painéis elaborados foram diferenciados nos modelos a partir dos carregamentos aplicados sob as vigas, simulando painéis de vedação, onde sua diferença está diretamente relacionada com a massa específica de cada traço mantendo por igual todas as propriedades do modelo apresentadas abaixo.

3.6.1.1 Parâmetros de material

Tabela 3.10 – Tabela de resistências do betão utilizado (Lajes, Vigas e Fundações).

Pavimento	Lajes (MPa)	Vigas (MPa)	Fundações (MPa)
Cobertura	30	30	30
Tipo	30	30	30
Fundacao	30	30	30

Tabela 3.11 – Tabela de resistências do betão utilizado (Pilares).

Piso	Pavimento	fck do pilar (MPa)
11	Cobertura	30
10	Tipo	30
9	Tipo	30
8	Tipo	30
7	Tipo	30
6	Tipo	30
5	Tipo	30
4	Tipo	30
3	Tipo	30
2	Tipo	30
1	Tipo	30
0	Fundacao	30

Tabela 3.12 – Tabela com módulo de elasticidade adotado.

	AlfaE	Ecs (MPa)	Eci(MPa)	Gc(MPa)
C0	1	0	0	0
C30	1	26838	30672	11183

Tabela 3.13 – Tabela com características do aço utilizado para armadura passiva.

Tipo de barra	Es (MPa)	fyk (MPa)	Massa específica (kgf/m ³)	n1
CA-25	210000	250	7850	1,00
CA-50	210000	500	7850	2,25
CA-60	210000	600	7850	1,40

Tabela 3.14 – Tabela com características do aço utilizado para armadura ativa.

Tipo de barra	Ep (MPa)	fpyk (MPa)	fptk (MPa)	Massa específica (kgf/m ³)	n1
CP190-12,7	200000	1750	1900	7850	1,0

3.6.1.2 Parâmetros de durabilidade

Para o projeto foi adotado uma Classe de Agressividade Ambiental II, utilizada para o dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais. A partir da classe de agressividade adotada, os seguintes cobrimentos foram utilizados (Tabela 3.15).

Tabela 3.15 – Tabela com cobrimentos adotados.

Elemento Estrutural	Cobrimento (cm)
Lajes convencionais (superior / inferior)	2 / 2
Lajes protendidas (superior / inferior)	3 / 3
Vigas	2,5
Pilares	2,5

3.6.1.3 Ações e combinações

Tabela 3.16 – Tabela com ações e combinações adotadas (TREF).

Pavimento	Peso Próprio (tf/m ²)	Permanente (tf/m ²)	Acidental (tf/m ²)
Cobertura	0,36	0,18	0,14
Tipo	0,40	0,65	0,15

Tabela 3.17 – Tabela com ações e combinações adotadas (TARG).

Pavimento	Peso Próprio (tf/m ²)	Permanente (tf/m ²)	Acidental (tf/m ²)
Cobertura	0,36	0,18	0,14
Tipo	0,40	0,54	0,15

Tabela 3.18 – Tabela com ações e combinações adotadas (TEPS).

Pavimento	Peso Próprio (tf/m ²)	Permanente (tf/m ²)	Acidental (tf/m ²)
Cobertura	0,36	0,18	0,14
Tipo	0,40	0,58	0,15

3.6.1.4 Vento

Para a elaboração do projeto foi considerado que o edifício fosse construído no município de São Paulo com os seguintes fatores sendo considerados para o cálculo do projeto:

- Velocidade do básica do vento = 37,0 m/s;
- Fator topográfico (S1) = 1,0;
- Categoria de rugosidade (S2) = IV – Terrenos com obstáculos numerosos e pouco espaçados;
- B – Maior dimensão horizontal ou vertical entre 20,0 m e 50,0 m;
- Fator estatístico (S3) = 1,0 – Edificações em geral;

A seguir na Tabela 3.17 estão apresentados os valores de coeficiente de arrasto, área de projeção do edifício e pressão, calculados com os dado apresentados acima.

Tabela 3.19 – Tabela com os resultados de carga dos ventos.

Caso	Ângulo (°):	Coef. arrasto	Área (m ²):	Pressão (tf/m ²):
5	90	1,23	633,5	0,078
6	270	1,23	633,5	0,078
7	0	1,18	574,0	0,075
8	180	1,18	574,0	0,075

3.6.1.5 Resumo das combinações

O modelo estrutural utilizado adotou para seu dimensionamento as seguintes combinações:

- ELU1/PERMACID/PP+PERM+ACID
- ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT1
- ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT2
- ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT3
- ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT4
- ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.5ACID+VENT1
- ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.5ACID+VENT2
- ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.5ACID+VENT3
- ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.5ACID+VENT4
- ELU1/PERMACID/PP_V+PERM_V+ACID_V
- ELU1/ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT1
- ELU1/ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT2
- ELU1/ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT3
- ELU1/ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT4
- ELU1/ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT1
- ELU1/ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT2
- ELU1/ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT3
- ELU1/ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT4
- ELS/CFREQ/PP+PERM+0.4ACID
- ELS/CFREQ/PP+PERM+0.3ACID+0.3VENT1
- ELS/CFREQ/PP+PERM+0.3ACID+0.3VENT2

- ELS/CFREQ/PP+PERM+0.3ACID+0.3VENT3
- ELS/CFREQ/PP+PERM+0.3ACID+0.3VENT4
- ELS/CQPERM/PP+PERM+0.3ACID
- ELS/CFREQ/PP_V+PERM_V+0.4ACID_V
- ELS/CFREQ/PP_V+PERM_V+0.3ACID_V+0.3VENT1
- ELS/CFREQ/PP_V+PERM_V+0.3ACID_V+0.3VENT2
- ELS/CFREQ/PP_V+PERM_V+0.3ACID_V+0.3VENT3
- ELS/CFREQ/PP_V+PERM_V+0.3ACID_V+0.3VENT4
- ELS/CQPERM/PP_V+PERM_V+0.3ACID_V

Tabela 3.20 – Tabela com resumo das combinações no modelo global.

Tipo	Descrição	N. Combinações
ELU1	Verificações de estado limite último - Vigas e lajes	18
ELU2	Verificações de estado limite último - Pilares e fundações	18
ELS	Verificações de estado limite de serviço	12

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

A partir dos ensaios realizados, o traços apresentaram as seguintes aberturas: TREF – 70 cm, TARG – 62 cm e TEPS1 – 70 cm. Com base na norma NBR 15823-1 [13], tanto TREF como TEPS1 se enquadrariam na classe SF2 com espalhamento entre 660 e 750 mm, enquanto se enquadraria na classe SF1 com espalhamento variando entre 550 e 650 mm.



Figura 4.1 – Foto *slump flow* TREF.



Figura 4.2 – Foto *slump flow* TARG.



Figura 4.3 – Foto *slump flow* TEPS1.

Conforme as classificações apresentadas pela tabela 3.8 é possível verificar se os betões dosados atendem aos valores recomendados para a execução de painéis. Com base nas classificações quanto aos elementos, somente o TREF estaria aprovado para o objeto do estudo.

Além do espalhamento, pode-se classificar cada traço quanto a seu índice de estabilidade visual (IEV), que busca observar a distribuição dos agregados graúdos da mistura, a distribuição da fração de argamassa e se houve ou não exsudação. Com base nas análises realizadas, o traço TEPS1 recebeu classificação IEV2, TARG IEV1 enquanto que o TREF recebeu classificação IEV 0.

Por fim, no estado fresco, foram avaliadas as massas específicas no estado fresco, cujos resultados então apresentados na Tabela 4.1. Conforme a classificação apresentada pela NBR 8953 [6], os betões dosados atingiram os valores citados anteriormente. Apenas o traço com brita apresentou resultado acima de 2000 kg/m³ (betão convencional) e os que levaram argila expandida e EPS, resultaram abaixo de 2000 kg/m³, classificando-se como betões leves.

Tabela 4.1 – Resultados no estado fresco.

Traço	Espalhamento (mm)	IEV	Massa específica (kg/m ³)
TREF	700	IEV0	2468
TARG	620	IEV1	1722
TEPS1	700	IEV2	1925

4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Como citado no item 3.3, foram moldados por traço 12 corpos de prova cilíndricos, sendo eles 3 destinados ao ensaio de compressão axial e outros 3 para o ensaio de tração por compressão diametral, enquanto que os dois protótipos foram submetidos ao ensaio de tração na flexão para cada idade estudada.

A partir dos resultados obtidos, foram calculadas médias aritméticas, desvios padrão e coeficiente de variação. Para os resultados que apresentaram coeficiente de variação superior a 10%, os valores que se distanciaram da média acima de um desvio padrão foram excluídos. Nos gráficos que serão apresentados a seguir, os valores representam as médias e desvios padrão após o tratamento dos dados.

4.2.1 Características corpos de prova

A seguir estão apresentados as características físicas apresentadas pelos corpos de prova antes de cada ensaio realizado, nas idades de 7 e 28 dias. Pode-se verificar uma diferença considerável entre a massa específica dos betões que levaram o EPS como agregado graúdo, onde em seu estado fresco apresentou uma densidade igual a 1925 kg/m³ e no estado endurecido esse valor caiu para em torno de 1400 kg/m³. Essa diferença está relacionada a segregação do EPS como pode ser visto nos itens a seguir.

Tabela 4.2 – TREF 7 dias.

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Tempo de propagação (μ s)	Velocidade de propagação (m/s)
1	100	198,5	3,86	42,9	4615
2	100	193,4	3,74	41,4	4662
3	100	196,2	3,8	42,4	4623
4	100,4	198,6	3,86	42,9	4615
5	100	197,7	3,84	42,4	4670
6	100,2	197,8	3,77	43,4	4562
P1				22,2	4580
				48,4	
P2				23,1	4444
				50,1	
Média massa específica (kg/m ³)				2458,21	

Tabela 4.3 – TARG 7 dias

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Tempo de propagação (μ s)	Velocidade de propagação (m/s)
1	100	203,6	3,02	47,4	4304
2	100,7	203	3,02	47,9	4238
3	100,8	201,5	2,73	48,4	4174
4	99,2	203,1	2,8	48,9	4151
5	100,1	205,2	2,74	50,7	4067
6	99,6	204,2	2,98	48,9	4172
P1				28,7	3085
				67,6	
P2				33,1	3352
				68,9	
Média massa específica (kg/m ³)				1801,31	

Tabela 4.4 – TEPS1 7 dias.

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Tempo de propagação (μ s)	Velocidade de propagação (m/s)
1	100	207,5	2,56	55,1	3757
2	100	210	2,6	61,9	3393
3	100	212	2,35	70,4	3011
4	100	218,5	2,31	75,1	2903
5	100,7	203,9	1,82	67,4	3001
6	-	-	-	-	-
P1				38,9	3509
				73,1	
P2				25,6	4317
				53,4	
Média massa específica (kg/m^3)				1405,09	

Tabela 4.5 – TREF 28 dias.

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Tempo de propagação (μ s)	Velocidade de propagação (m/s)
1	101	188,6	3,67	39,9	4712
2	100,1	194,9	3,80	40,9	4768
3	100,1	191,3	3,67	41,4	4638
4	100	192,2	3,74	41,4	4638
5	99	194,8	3,78	41,9	4654
6	100	194,6	3,79	41,4	4710
P1				20,4	4585
				45,7	
P2				23,4	4640
				48,4	
Média massa específica (kg/m^3)				2471,26	

Tabela 4.6 – TARG 28 dias.

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Tempo de propagação (μ s)	Velocidade de propagação (m/s)
1	99,6	207	2,84	52,1	3973
2	100,5	199,4	2,61	48,1	4173
3	99,8	199,6	2,86	47,4	4198
4	99,9	198,9	2,98	46,4	4289
5	100,3	197,6	2,74	47,7	4151
6	100	199,2	2,87	48,4	4112
P1				23,1	4107
				51,1	
P2				22,2	4218
				49,7	
Média massa específica (kg/m ³)				1476,67	

Tabela 4.7 – TEPS 28 dias.

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Tempo de propagação (μ s)	Velocidade de propagação (m/s)
1	100,2	203	1,75	64,7	3138
2	100,9	211,5	2,52	62,9	3355
3	100,7	212	2,30	62,9	3370
4	100	209	2,25	65,4	3196
5	100,5	209,1	2,38	67,7	3087
6	100	205,8	2,55	56,4	3635
P1				20,4	4143
				48,4	
P2				24,2	4427
				50,4	
Média massa específica (kg/m ³)				1388,92	

4.2.2 Resistência à compressão

Na Figura 4.4 estão apresentados os resultados de resistência à compressão. O único traço a apresentar a resistência desejada de 20 MPa foi o T_{REF} com médias de 65 e 75 MPa aos 7 e 28 dias respectivamente. Enquanto que T_{ARG} apresentou resistências inferiores a 20 MPa e T_{EPS1} não conseguiu ultrapassar 5 MPa, não podendo ser classificado como um betão estrutural conforme estabelecido pela NBR 8953 [6].

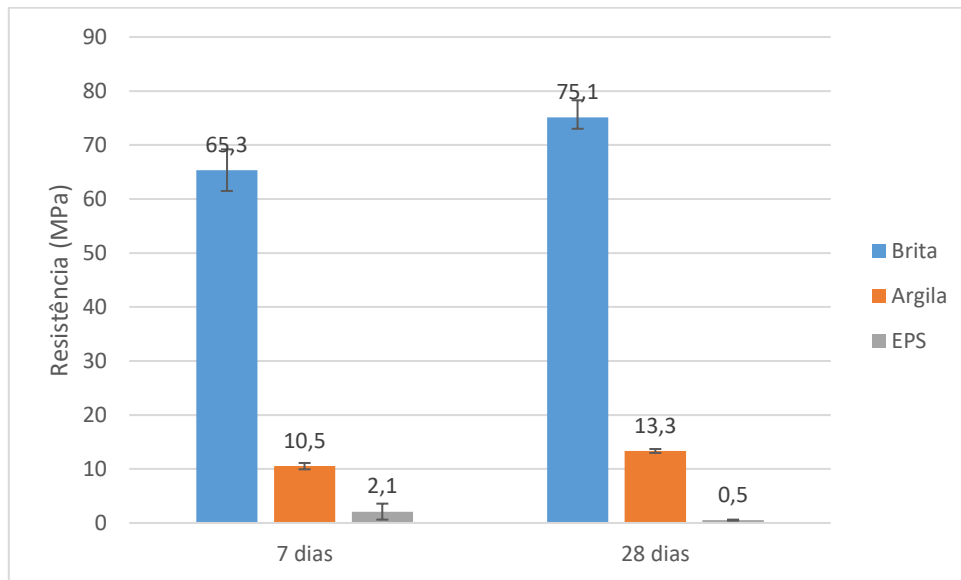


Figura 4.4 – Gráfico resistência a compressão.

Calderan (2019) utilizou um traço base de 1:2:3 como referência para suas dosagens e apresentou em seu estudo resistências médias iguais a 13,24 MPa para seu traço referência, 10,64 MPa para seu traço com argila expandida e 2,71 MPa para seu traço com EPS, enquanto que suas massas específicas ficaram na casa dos 2400 kg/m³, 1600 kg/m³ e 1250 kg/m³ respectivamente. Quando comparados com os resultados do presente estudo, podemos verificar uma diferença entre os traços que levaram a brita como agregado graúdo com uma diferença de aproximadamente 60 MPa, o que mostra a eficiência do método de dosagem utilizado, enquanto que o TEPS apresentou resultados semelhantes.



Figura 4.5 – Foto CP submetido ao ensaio de compressão TREF.



Figura 4.6 – Foto CP submetido ao ensaio de compressão TARG.



Figura 4.7 – Foto CP submetido ao ensaio de compressão TEPS1.

4.2.3 Tração por compressão diametral

Apresentam-se na Figura 4.8 os resultados de resistência à tração por compressão diametral. Diferente dos resultados apresentados pelos ensaios de compressão axial, os melhores resultados para o ensaio de tração por compressão diametral foram dos traços T_{REF} e T_{ARG} . Essa diferença provavelmente ocorreu devido à composição dos traços, pois tanto o T_{REF} como T_{ARG} utilizaram agregados graúdos de maior resistência mecânica quando comparados com o EPS. Nas Figuras 4.9/10/11 estão apresentadas imagens dos corpos de prova após o ensaio, sendo possível verificar a homogeneidade dos traços de acordo com a distribuição dos agregados graúdos utilizados.

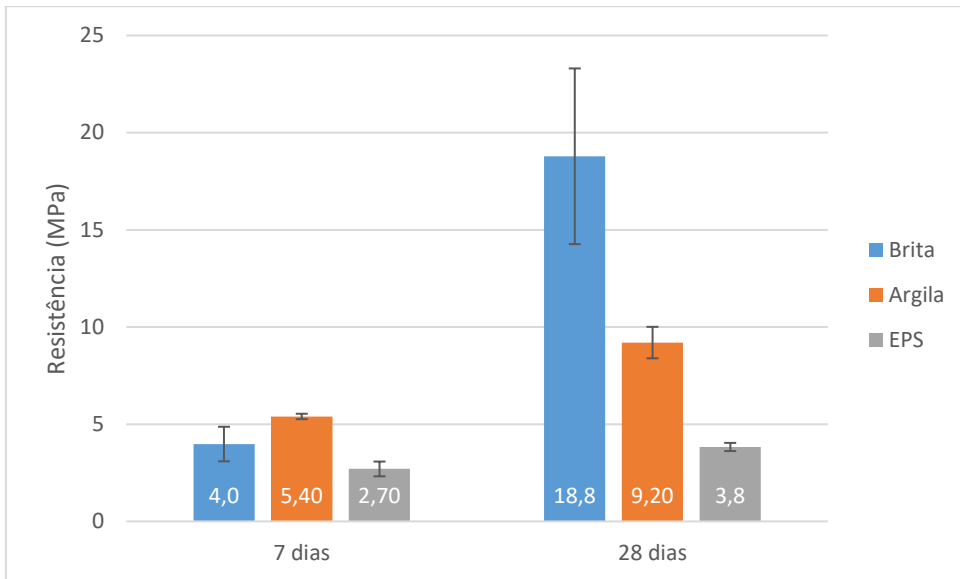


Figura 4.8 – Gráfico resistência a tração por compressão diametral.



Figura 4.9 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TREF.



Figura 4.10 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TARG.



Figura 4.11 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TEPS1.

4.2.4 Tração por flexão

Como já mencionado, as dimensões dos corpos de prova moldados e submetidos ao ensaio de tração na flexão utilizaram como referência o estudo de Lourensini (2017), que atingiu com seus protótipos as resistências apresentadas pela Tabela 4.9.

Tabela 4.8 - Resistências protótipos referência com diferentes materiais

Material utilizado no protótipo	Resistência média 28 dias (MPa)
EPS	6,4
Poliuretano	6,1
Maciço	3,8

Os resultados obtidos na presente pesquisa estão apresentados na Figura 4.12. Entre os protótipos moldados por Lourensini (2017), o que mais se assemelha a presente pesquisa é o denominado maciço. Sendo a diferença, quando comparado com o T_{REF} deste artigo, o uso de uma tela metálica no protótipo.

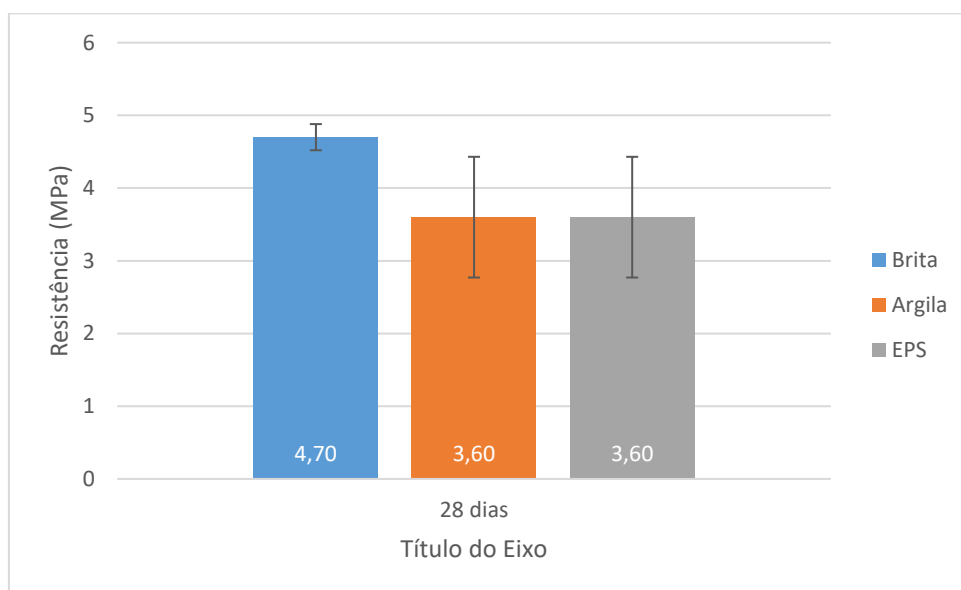


Figura 4.12 – Gráfico resistência a tração na flexão.

As Figuras 4.13/14/15 apresentam os protótipos rompidos. Pode-se perceber que os traços T_{ARG} e T_{EPS1} apresentaram traços de segregação, o que mostra a importância da análise de betões com agregados leves, pois quando comparado com as imagens apresentadas nas figuras presentes no item 4.2.3, os elementos já não apresentam a mesma homogeneidade e distribuição dos agregados, que para a indústria acaba por gerar certa insegurança, tanto estrutural como para seu controle de qualidade e logística.



Figura 4.13 – Foto protótipo submetido ao ensaio de tração na flexão TREF.



Figura 4.14 – Foto protótipo submetido ao ensaio de tração na flexão TARG.



Figura 4.15 – Foto protótipo submetido ao ensaio de tração na flexão TEPS1.

Na Figura 4.16 está apresentado um gráfico comparando os resultados obtidos pelos três ensaios destrutivos apresentados acima. Quando comparado com as premissas adotadas, somente o TREF conseguiu atingir os valores mínimos estipulados para atender o requisito de betão estrutural, enquanto que TARG e TEPS1 apresentaram resultados bem abaixo do esperado.

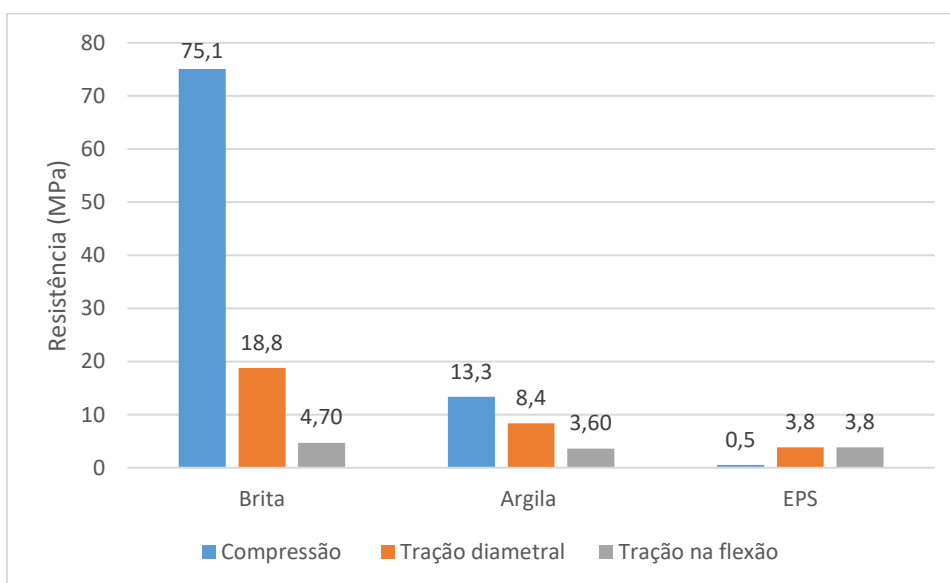


Figura 4.16 – Gráfico resultados dos ensaios dinâmicos.

4.2.5 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

Apresentado por Whitehurst (1996) apud Bauer (2019), a partir dos resultados obtidos pelo ensaio de propagação da onda ultrassônica, o betão convencional (TREF) foi qualificado como excelente, o betão com argila expanda (TARG) como bom e por fim o betão com EPS (TEPS1) como ruim.

Na Tabela 4.10, estão apresentado os valores referentes às velocidades médias obtidas pelo ensaio de propagação de ondas ultrassônicas (V), bem como os valores do módulo de elasticidade dinâmico ($E_{c,d}$) e classificação da qualidade do betão baseado nos resultados obtidos no ensaio de ultrassom, conforme indicado por Whitehurst (1996) apud Bauer (2019).

Tabela 4.9 - Velocidades de propagação e módulo de elasticidade dinâmico

Traço	Amostra	V (m/s)	Qualidade do betão	$E_{c,d}$ (GPa)
T_{REF}	Cilíndricos	4656	Excelente	48,14
	Protótipos	4562		46,23
T_{ARG}	Cilíndricos	4167	Boa	26,91
	Protótipos	4038		25,27
T_{EPS}	Cilíndricos	3259	Ruim	16,39
	Protótipos	2145		7,10

4.3 REFORMULAÇÃO TRAÇO COM EPS

Através dos resultados apresentados, quando comparados os resultados do TARG e TEPS1 pode-se verificar que o segundo apresentou resultados inferiores ao primeiro. Portanto, com o objetivo de atingir as objetivos do presente estudo, foram elaborados novos traços utilizando como base o TEPS1.

Além do objetivo de atingir resistências a compressão acima dos 20 MPa e espalhamento acima dos 550 mm, foi colocado como meta reduzir e estabilizar a massa específica do betão que até o momento era de 1925 kg/m³ no estado fresco e aproximadamente 1400 kg/m³ em seu estado endurecido. Portanto, para que não fosse afetada a premissa de utilizar a base empacotada do TARG, as mudanças acima do TEPS1 foram acima da quantidade de EPS, água e aditivos utilizados.

Após realizar as modificações acima do traço (TEPS1), os seguintes traços foram produzidos (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Traços com EPS.

Traços unitários			
Material/Traço	TEPS2	TEPS3	TEPS4
Cimento - CPV ARI	1	1	1
Superplastificante - Powerflow 4001	0,015	0,015	0,015
Murafan 38	0,01	0,01	0,01
Muraplast FK 101	0,006	0,005	0,006
Água	0,23	0,23	0,25
Areia Fina	1,518	1,518	1,518
Pedrisco (Brita 0)	-	-	-
Argila Expandida	-	-	-
Esfera de Poliestireno Expandido	0,013	0,12	0,012

Para a análise dos traços experimentais foram moldados corpos de prova com dimensão 50mm de diâmetro e 100 mm de altura, diferente dos elaborados até o momento. Através das Figuras 4.17/18/19 podemos verificar a distribuição do EPS nos traços apresentados acima.



Figura 4.17 – Foto CP teste TEPS2.



Figura 4.18 – Foto CP teste TEPS3.



Figura 4.19 – Foto CP teste TEPS4.

A partir dos resultados apresentados, o TEPS3 foi escolhido para moldagem dos corpos de prova que seriam submetidos a todos os ensaios, destrutivos e não destrutivos, apresentados nos itens anteriores. Portanto, foram moldados para sua avaliação 12 corpos de prova cilíndricos (100x200mm) e 2 protótipos, sendo 6 corpos de prova cilíndricos submetidos ao ensaio de compressão axial e os outros 6 ao ensaio de tração por compressão diametral, 3 por idade (7 e 28 dias), enquanto que os protótipos foram ensaiados somente aos 28 dias pelo ensaio de tração na flexão.

4.3.1 Ensaio estado fresco



Figura 4.20 – Foto slump *Flow* TEPS3.

Tabela 4.11 – Resultados ensaios no estado fresco

Traço	Espalhamento (mm)	IEV	Massa específica (kg/m ³)
TEPS3	680	IEV1	1715

4.3.2 Características dos corpos de prova

Estão apresentados abaixo os resultados obtidos pelos novos corpos de prova (TEPS3), colocados ao lado dos resultados apresentados pelo traço TEPS1.

Tabela 4.12 – Características TEPS3 7 dias.

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Tempo de propagação (μ s)	Velocidade de propagação (m/s)
1	99,90	199,40	3,08	43,8	4543
2	100,00	198,90	2,97	43,4	4585
3	100,45	199,10	2,89	43,8	4543
4	100,40	199,25	2,88	43,9	4533
5	99,80	199,70	2,87	43,8	4543
6	100,00	199,45	2,82	44,1	4512
Média massa específica (kg/m ³)				1859,61	

Tabela 4.13 – Características TEPS3 28 dias.

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Tempo de propagação (μ s)	Velocidade de propagação (m/s)
1	99,85	194,90	3,21	41,9	4654
2	99,70	198,80	2,87	43,9	4510
3	98,60	199,90	2,73	44,4	4505
4	99,50	198,45	2,91	43,9	4510
5	99,95	195,50	2,98	42,9	4569
6	99,85	196,80	2,87	43,4	4539
P1				39,4	4419
				70,4	
P2				31,1	4204
				64,4	
Média massa específica (kg/m ³)				1904,70	

4.3.3 Resultados no estado endurecido

A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios realizados no estado endurecido: Compressão, Tração por compressão diametral, Tração na flexão e Ensaio de propagação da onda ultrassônica.

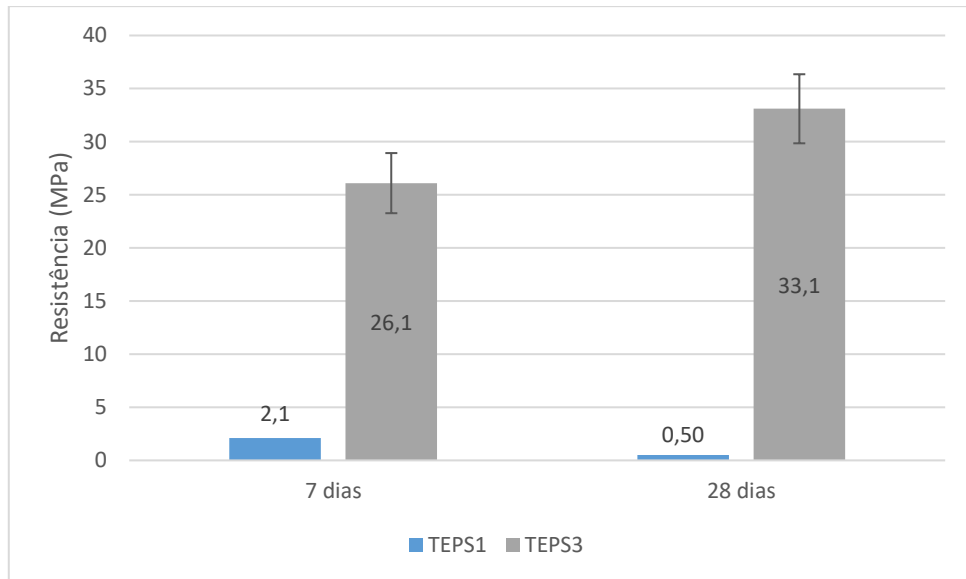


Figura 4.21 – Gráfico resultados compressão TEPS1 e TEPS3.



Figura 4.22 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TEPS3.

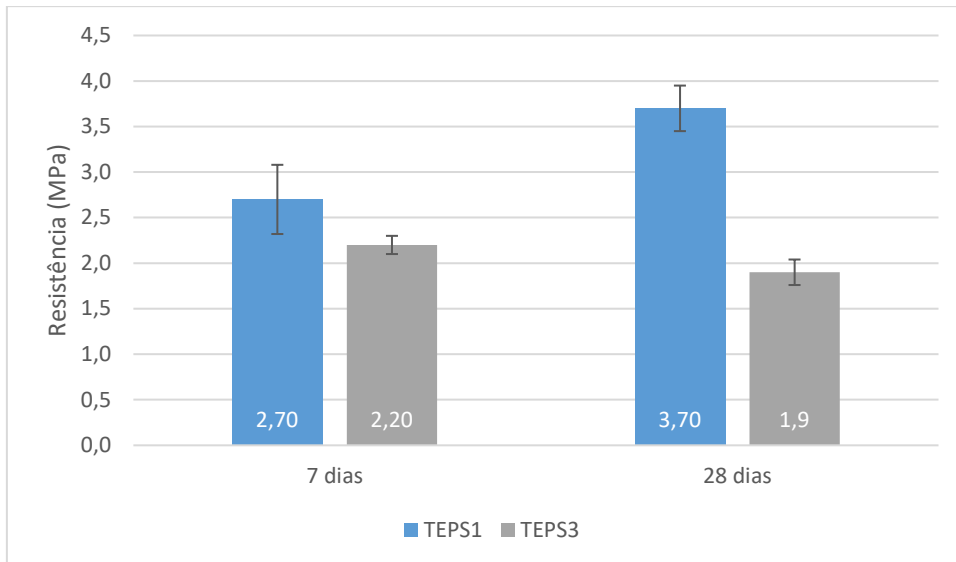


Figura 4.23 – Gráfico resultados tração por compressão TEPS3.

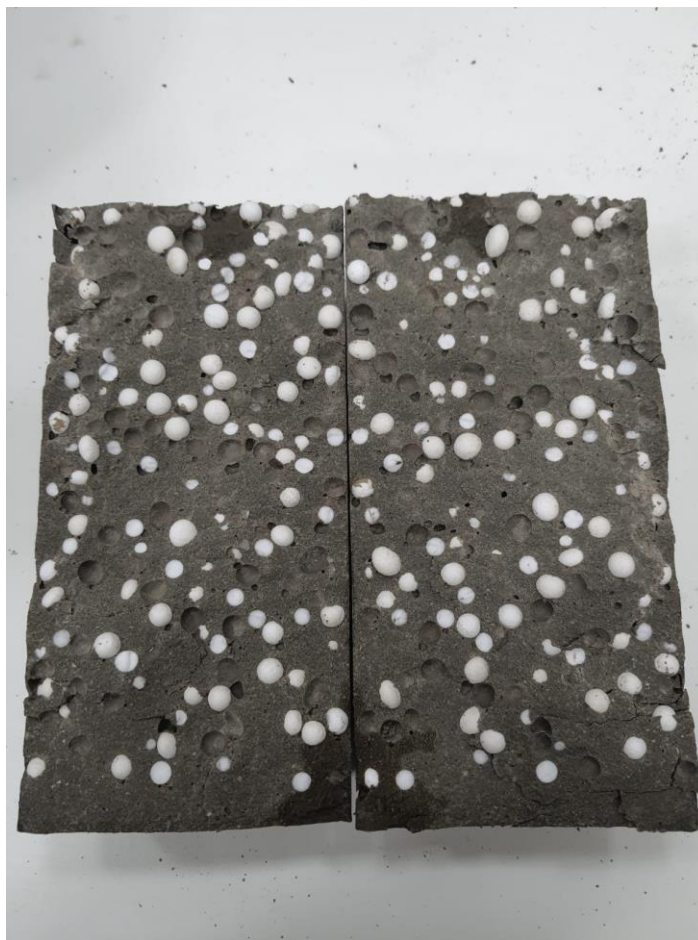


Figura 4.24 – Foto CP submetido ao ensaio de tração por compressão TEPS3.

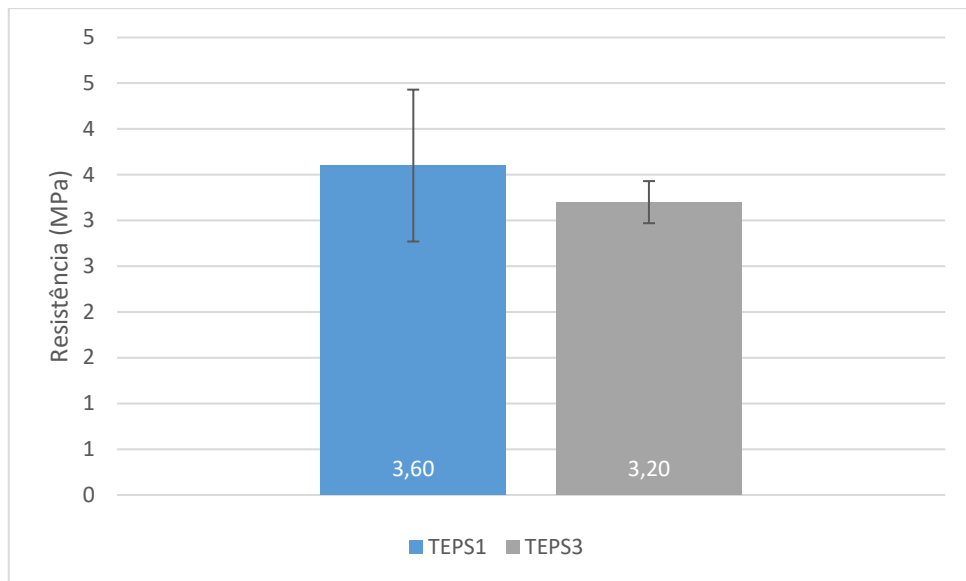


Figura 4.25 – Resultados tração na flexão TEPS3.



Figura 4.26 – Foto CP submetido ao ensaio de tração na flexão TEPS3.

Tabela 4.14 – Resultados ultrassom TEPS3

Traço	Amostra	V (m/s)	Qualidade do betão	Ec,d (GPa)
TEPS3	Cilíndricos	4546	Boa	31,89
	Protótipos	4020		24,94

4.4 MODELO ESTRUTURAL

Para avaliação do impacto causado pelos diferentes betões dosados, foi realizado o carregamento de todas as vigas de contorno dos pavimentos tipo do edifício (Figura 3.23), utilizando como base a massa específica dos betões no estado endurecido sendo elas: 2468 kg/m³ (TREF), 1722 kg/m³ (TARG) e 1900 kg/m³ (TEPS3), considerando a espessura de 20 cm apresentada na elaboração dos protótipos. A partir das considerações apresentadas, os próximos itens apresentam os resultados fornecidos pelo *software* TQS.

4.4.1 Cargas

Como citado no item acima, a avaliação estrutural foi realizada através dos carregamentos de todas as vigas de contorno dos pavimentos tipo do edifício, contudo será apresentado somente o resultado da viga com código V101. As cargas aplicadas sob a viga podem ser vistas na Tabela 4.15, onde a carga adotada no modelo corresponde ao carregamento linear de um painel com 0,2 m de espessura e 2,8 m de altura.

Tabela 4.15 – Tabela de cargas.

Traço	Carga (tf/m)
TREF	1,38
TEPS3	1,06
TARG	0,96

4.4.2 Gráficos resultantes

Através da aplicação das cargas apresentadas na Tabela 4.15 a viga V101 apresentou os seguintes gráficos, onde são apresentados o momento, força cortante e normal.

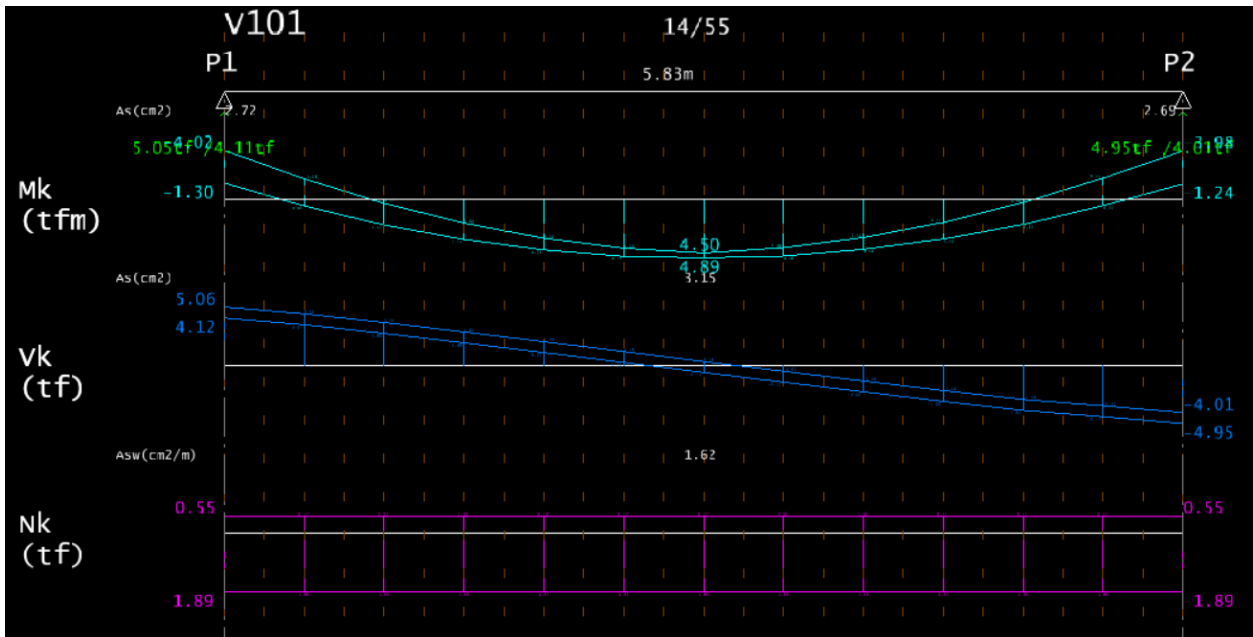


Figura 4.27 – Gráficos V101 TREF.

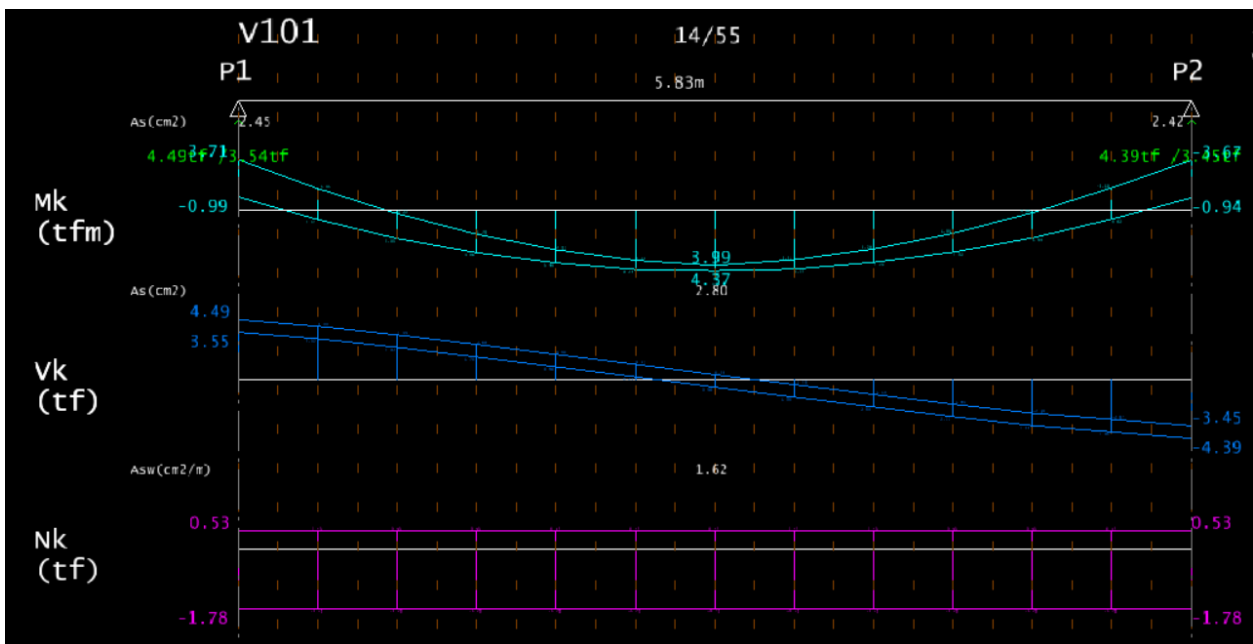


Figura 4.28 – Gráficos V101 TARG.

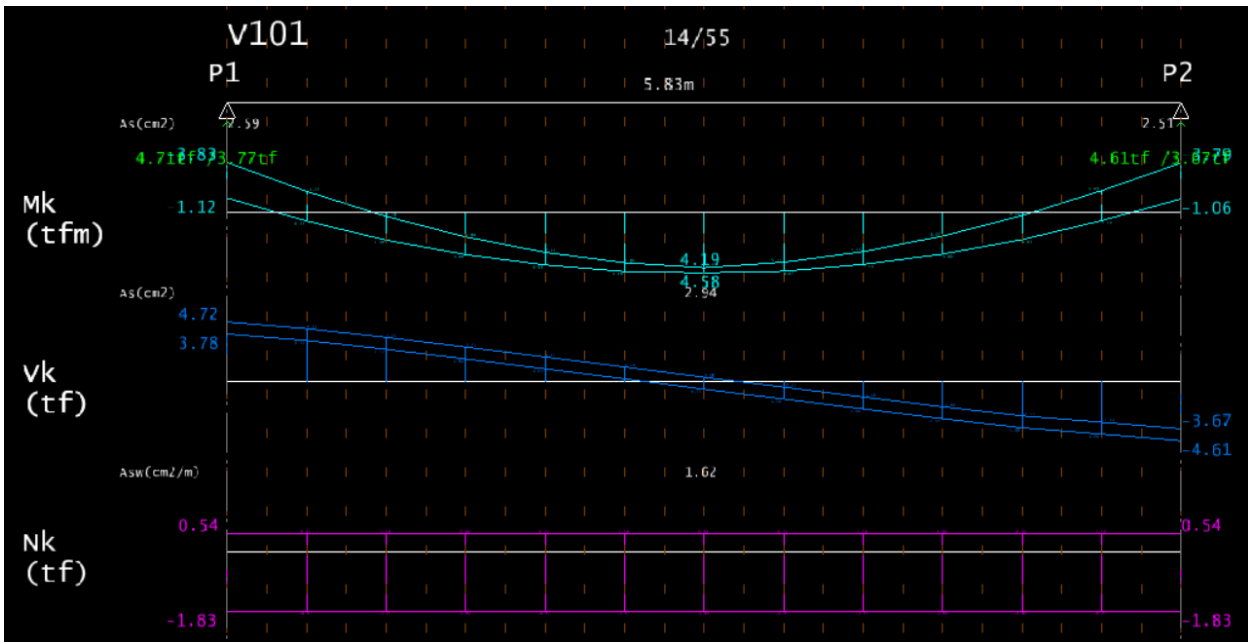


Figura 4.29 – Gráficos V101 TEPS3.

4.4.3 Armadura mínima

Uma das ferramentas presente no *software* utilizado utiliza as normas brasileiras de estruturas de concreto armado e elabora através dos esforços carregados em cada viga um desenho de armadura mínima para cada elemento. As figuras abaixo apresentam a distribuição da armadura mínima calculada para a viga V101 quando submetida ao carregamento dos painéis com betão dosado, seguidos de tabelas com o comportamento dos pilares P1 e P2 localizados em suas extremidades compatibilizando todos os pavimentos.

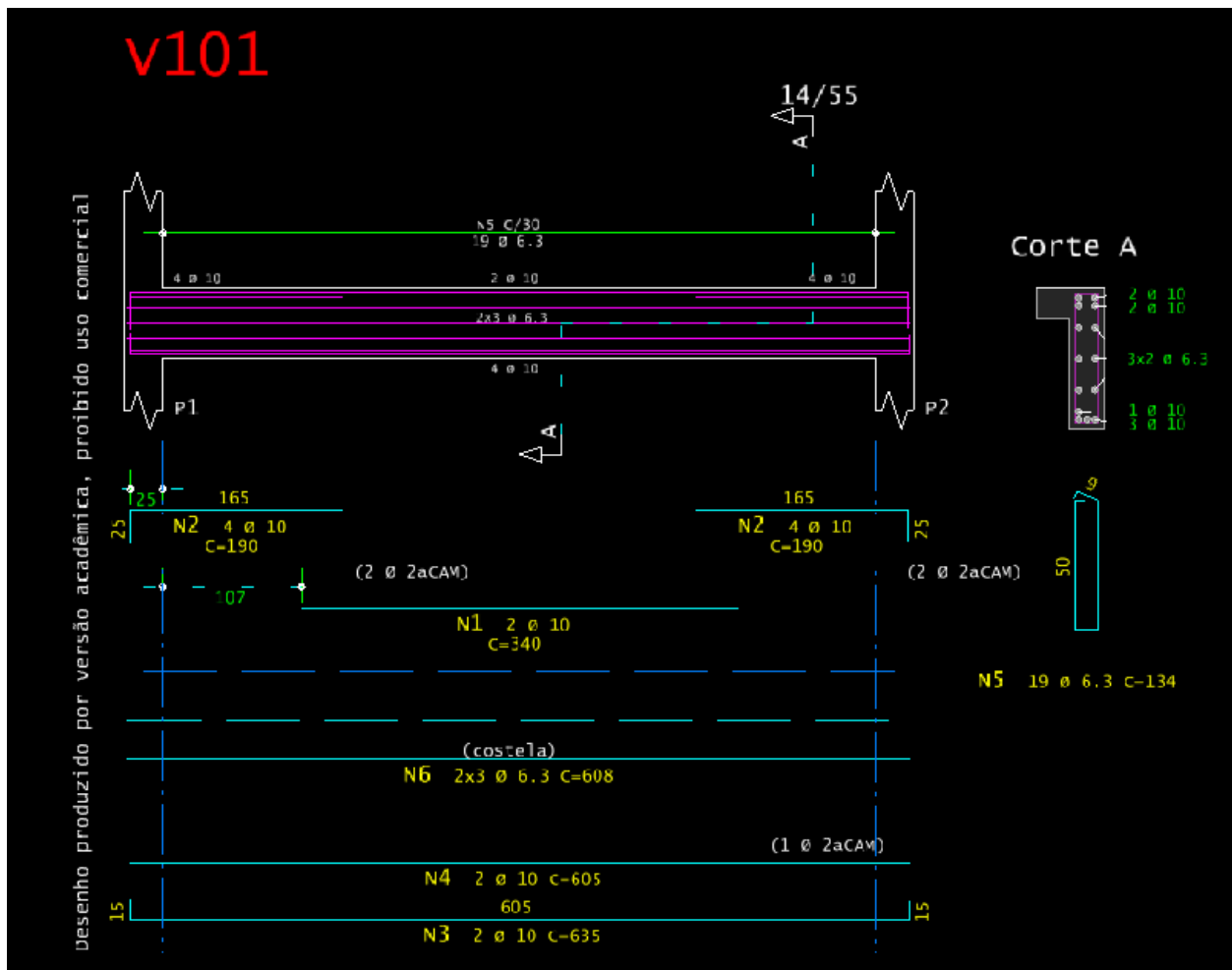


Figura 4.30 – Armadura V101 TREF.

Lance	Pavimento	Seção		Armadura longitudinal					v	σ (kgf/cm ²)	Esbeltez		f_{ck} (MPa)	c (cm)	2ª Ordem
		Formato (cm)	A (cm ²)	n	\emptyset (mm)	A_s (cm ²)	ρ (%)	ρ_{Tras} (%)			λ_x	λ_y			
11	Cobertura	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.04	8.4	46	30	30	2.5	-
10	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.13	27.3	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
9	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.22	46.2	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
8	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.3	65.1	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
7	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.39	84	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
6	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.48	102.8	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
5	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.41	0.57	121.6	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
4	Tipo	19X30	570.00	4	12.5	4.90	0.86	2.98	0.65	140.3	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
3	Tipo	19X30	570.00	6	16	12.10	2.12	5.42	0.74	158.9	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
2	Tipo	19X30	570.00	6	20	18.80	3.31	6.61	0.83	177.2	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
1	Tipo	19X30	570.00	6	20	18.80	3.31	3.31	0.91	195.1	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.

Figura 4.31 – Dados P1 dimensionado TREF.

Lance	Pavimento	Seção		Armadura longitudinal					v	σ (kgf/cm ²)	Esbeltez		f_{ck} (MPa)	c (cm)	2ª Ordem
		Formato (cm)	A (cm ²)	n	\varnothing (mm)	A_s (cm ²)	ρ (%)	ρ_{Tras} (%)			λ_x	λ_y			
11	Cobertura	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.04	8.5	46	30	30	2.5	-
10	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.13	27	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
9	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.21	45.5	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
8	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.3	64	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
7	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.38	82.5	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
6	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.47	100.9	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
5	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.41	0.56	119.4	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
4	Tipo	19X30	570.00	4	12.5	4.90	0.86	2.27	0.64	137.8	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
3	Tipo	19X30	570.00	4	16	8.00	1.41	3.53	0.73	156.2	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
2	Tipo	19X30	570.00	6	16	12.10	2.12	4.94	0.81	174.5	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
1	Tipo	19X30	570.00	8	16	16.10	2.82	2.82	0.9	192.5	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.

Figura 4.32 – Dado P2 dimensionado TREF.

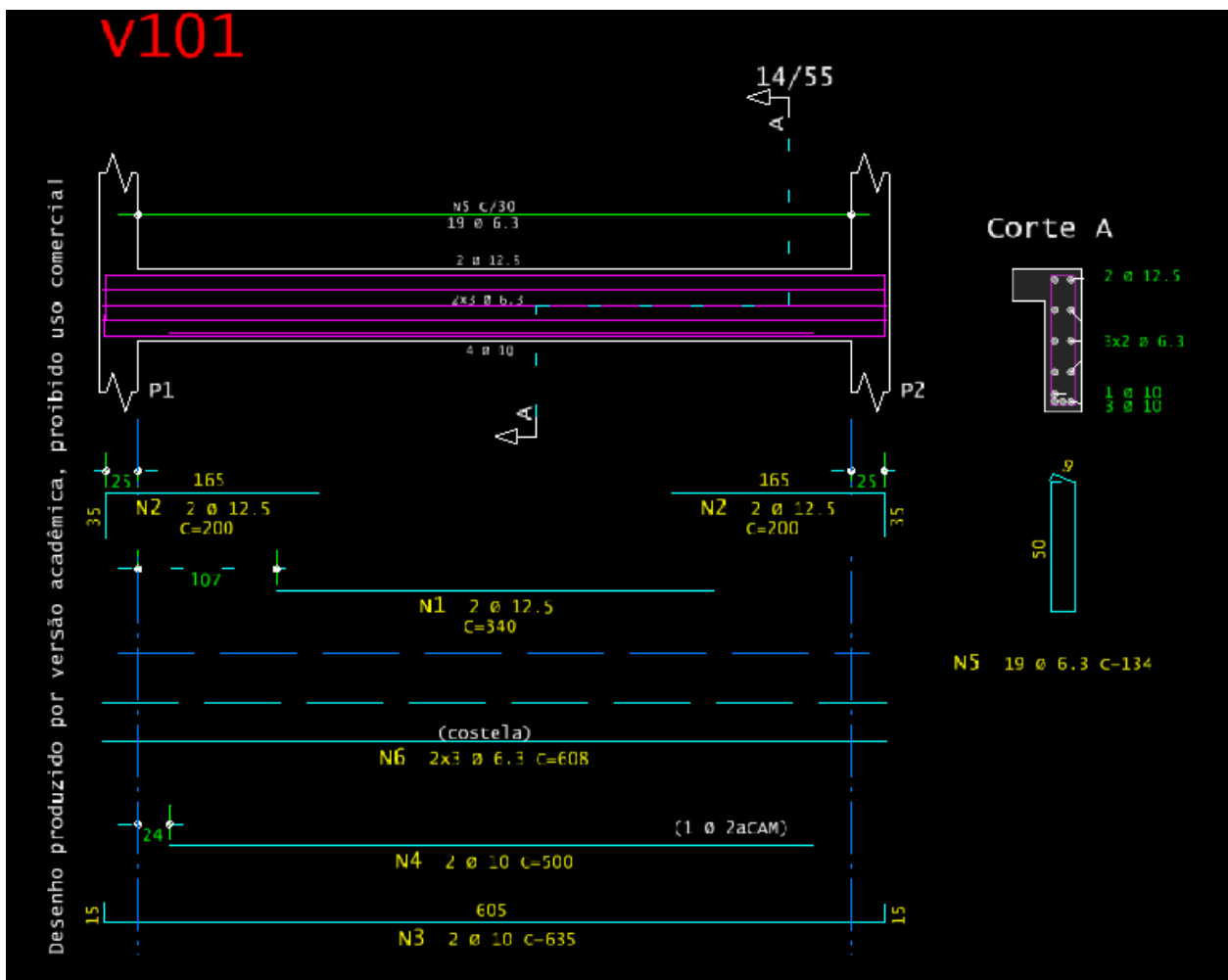


Figura 4.33 – Armadura V101 TARG.

Lance	Pavimento	Seção		Armadura longitudinal				v	σ (kgf/cm ²)	Esbeltez		f_{ck} (MPa)	c (cm)	2ª Ordem	
		Formato (cm)	A (cm ²)	n	\emptyset (mm)	A_s (cm ²)	ρ (%)			ρ_{Tras} (%)	λ_x				λ_y
11	Cobertura	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.04	8.4	46	30	30	2.5	-
10	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.12	25.1	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
9	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.2	41.9	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
8	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.27	58.6	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
7	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.35	75.3	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
6	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.43	92	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
5	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.51	108.6	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
4	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.84	0.58	125.2	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
3	Tipo	19X30	570.00	6	12.5	7.40	1.29	3.41	0.66	141.6	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
2	Tipo	19X30	570.00	6	16	12.10	2.12	4.94	0.74	157.8	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
1	Tipo	19X30	570.00	8	16	16.10	2.82	2.82	0.81	173.5	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.

Figura 4.34 – Dados P1 dimensionado P1.

Lance	Pavimento	Seção		Armadura longitudinal				v	σ (kgf/cm ²)	Esbeltez		f_{ck} (MPa)	c (cm)	2ª Ordem	
		Formato (cm)	A (cm ²)	n	\emptyset (mm)	A_s (cm ²)	ρ (%)			ρ_{Tras} (%)	λ_x				λ_y
11	Cobertura	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.04	8.5	46	30	30	2.5	-
10	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.12	24.8	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
9	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.19	41.1	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
8	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.27	57.5	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
7	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.34	73.8	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
6	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.42	90.1	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
5	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.5	106.4	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
4	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.41	0.57	122.6	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
3	Tipo	19X30	570.00	4	12.5	4.90	0.86	2.58	0.65	138.8	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
2	Tipo	19X30	570.00	8	12.5	9.80	1.72	4.54	0.72	155	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
1	Tipo	19X30	570.00	8	16	16.10	2.82	2.82	0.8	170.8	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.

Figura 4.35 – Dados P2 dimensionado TARG

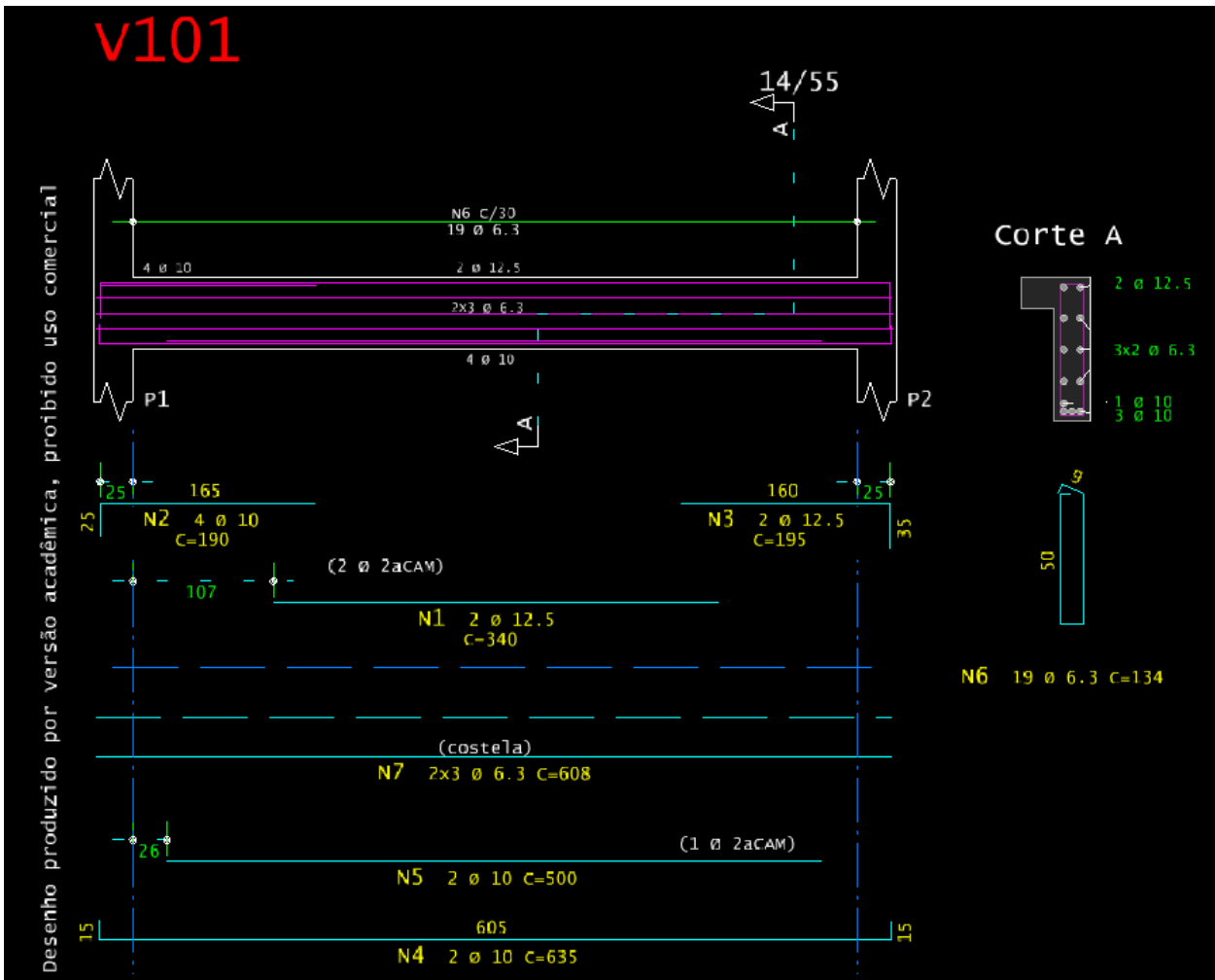


Figura 4.36 – Armadura V101 TEPS3.

Lance	Pavimento	Seção		Armadura longitudinal					v	σ (kgf/cm ²)	Esbeltez		f_{ck} (MPa)	c (cm)	2ª Ordem
		Formato (cm)	A (cm ²)	n	Ø(mm)	A_s (cm ²)	ρ (%)	ρ_{Tras} (%)			λ_x	λ_y			
11	Cobertura	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.04	8.4	46	30	30	2.5	-
10	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.12	26	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
9	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.2	43.6	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
8	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.29	61.2	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
7	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.37	78.8	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
6	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.45	96.3	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
5	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.53	113.8	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
4	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.96	0.61	131.2	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
3	Tipo	19X30	570.00	4	16	8.00	1.41	3.53	0.69	148.5	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
2	Tipo	19X30	570.00	6	16	12.10	2.12	4.94	0.77	165.5	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.
1	Tipo	19X30	570.00	8	16	16.10	2.82	2.82	0.85	182.1	46	30	30	2.5	PP c/ k aprox.

Figura 4.37 – Dados P1 dimensionado TEPS3.

Lance	Pavimento	Seção		Armadura longitudinal					v	σ (kgf/cm ²)	Esbeltez		f_{ck} (MPa)	c (cm)	2ª Ordem
		Formato (cm)	A (cm ²)	n	\emptyset (mm)	A_s (cm ²)	ρ (%)	ρ_{Tras} (%)			λ_x	λ_y			
11	Cobertura	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.04	8.5	46	30	30	2.5	-
10	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.12	25.7	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
9	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.2	42.9	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
8	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.28	60.1	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
7	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.36	77.2	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
6	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.44	94.4	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
5	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.1	0.52	111.6	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
4	Tipo	19X30	570.00	4	10	3.10	0.55	1.84	0.6	128.7	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
3	Tipo	19X30	570.00	6	12.5	7.40	1.29	3.41	0.68	145.8	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
2	Tipo	19X30	570.00	6	16	12.10	2.12	4.94	0.76	162.8	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.
1	Tipo	19X30	570.00	8	16	16.10	2.82	2.82	0.84	179.4	46	30	30	2.5	PP c/ κ aprox.

Figura 4.38 – Dados P2 dimensionado TEP33.

Pode-se verificar uma redução na armadura das vigas quando comparados os carregamentos dos painéis com TREF e TARG e dos pilares quando comparado os resultados do mesmo no 11º pavimento e 1º pavimento, o que valida o modelo utilizado.

4.4.4 Armadura calculada

A seguir estão apresentados a quantidade e dimensões da barras calculadas para as vigas V101 apresentadas acima. Através dos resultados podemos verificar uma redução de 1 kg quando comparados os carregamentos dos traços TREF/TEPS3 e TARG.

ELEM	AÇO	POS	BIT mm	QUANT	COMPRIMENTO	
					UNIT cm	TOTAL cm

V101	50A	1	10	2	340	680
	50A	2	10	8	190	1520
	50A	3	10	2	635	1270
	50A	4	10	2	605	1210
	50A	5	6.3	19	134	2546
	50A	6	6.3	6	608	3648

RESUMO DE AÇO						
	ACO		BIT mm	COMPR m	PESO kgf	
	50A		6.3	62	15	
	50A		10	47	29	
	Peso Total			50A =	44 kgf	

Resumo de aço por elemento						
ELEM					PESO kgf	PESO kgf+10%
V101					44	48

Figura 4.39 – Quantidade de aço V101 TREF.

ELEM	AÇO	POS	BIT mm	QUANT	COMPRIMENTO	
					UNIT cm	TOTAL cm

V101	50A	1	12.5	2	340	680
	50A	2	12.5	4	200	800
	50A	3	10	2	635	1270
	50A	4	10	2	500	1000
	50A	5	6.3	19	134	2546
	50A	6	6.3	6	608	3648

RESUMO DE AÇO			
ACO	BIT mm	COMPR m	PESO kgf

50A	6.3	62	15
50A	10	23	14
50A	12.5	15	14
Peso Total		50A =	43 kgf

Resumo de aço por elemento			
ELEM	PESO kgf	PESO kgf+10%	

V101	43	48	

Figura 4.40 – Quantidade de aço V101 TARG

ELEM	AÇO	POS	BIT mm	QUANT	COMPRIMENTO	
					UNIT cm	TOTAL cm

V101	50A	1	12.5	2	340	680
	50A	2	10	4	190	760
	50A	3	12.5	2	195	390
	50A	4	10	2	635	1270
	50A	5	10	2	500	1000
	50A	6	6.3	19	134	2546
	50A	7	6.3	6	608	3648

RESUMO DE AÇO			
ACO	BIT mm	COMPR m	PESO kgf

50A	6.3	62	15
50A	10	30	19
50A	12.5	11	10
Peso Total		50A =	44 kgf

Resumo de aço por elemento			
ELEM	PESO kgf	PESO kgf+10%	

V101	44	49	

Figura 4.41 – Quantidade de aço V101 TEPS3.

4.4.5 ANALISE GLOBAL

Além das análises individuais apresentadas acima, o *software* consegue exportar um relatório onde é possível verificar a quantidade de aço utilizada em cada modelo. Os valores da massa de aço utilizada em cada modelo podem ser vistas nas Figuras 4.43/44/45 abaixo.

Pasta	Aço (kgf)				
	Pilares	Vigas	Lajes	Fundações	Outros
Cobertura	838	1807	1818	0	0
Tipo	13747	20494	20502	0	0
TOTAL	14585	22301	22320	0	0

Figura 4.42 – Quantidade aço TREF.

Pasta	Aço (kgf)				
	Pilares	Vigas	Lajes	Fundações	Outros
Cobertura	817	1812	1818	0	0
Tipo	12305	20057	19686	0	0
TOTAL	13122	21869	21505	0	0

Figura 4.43 – Quantidade de aço TARG.

Pasta	Aço (kgf)				
	Pilares	Vigas	Lajes	Fundações	Outros
Cobertura	827	1800	1818	0	0
Tipo	12708	20308	19785	0	0
TOTAL	13535	22107	21604	0	0

Figura 4.44 – Quantidade de aço TEPS3.

Através dos resultados apresentados acima, podemos verificar que a quantidade de aço utilizado foi reduzindo conforme a massa específica dos betões utilizados, com os maiores valores de massa específica estando diretamente relacionados com os maiores valores de aço utilizados.

Tabela 4.16 – Relação massa específica x Aço

Traço	Massa específica (kg/m ³)	Aço (kg)
TREF	2468	59206
TEPS3	1900	57246
TARG	1722	56496

A partir da Tabela 4.16 pode-se verificar uma redução de aproximadamente 2700 kg de aço quando comparados os traços TREF e TARG, mostrando potencial visto que foram substituídos somente os fechamentos do contorno do edifício.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos objetivos do presente trabalho foi elaborar traços de betão que apresentassem propriedades físicas e mecânicas para aplicação em painéis pré-fabricados maciços. Para tal, foram adotados métodos não convencionais como o caso do empacotamento de partículas, que no final apresentou resultados divergentes para cada traço.

Por se tratar de um método de dosagem não muito utilizado, o sistema adotado com o uso do empacotamento de partículas ainda apresenta algumas divergências, principalmente quando considerada a consistência e distribuição dos agregados com densidades muito inferiores (leves). Contudo, como pode ser visto nos itens que apresentaram os resultados de resistência dos betões, o método apresenta bons resultados, principalmente nos ensaios de compressão.

Através da análise estrutural, foi possível verificar o impacto que painéis com diferentes massas específicas podem gerar acima de um edifício de 10 pavimentos, quando comparado o uso de painéis com massa específica comumente utilizada (TREF – 2468 kg/m³), os painéis de betão leve apresentaram uma redução de aproximadamente 5% na quantidade de aço utilizada, além de uma redução de aproximadamente 23% (TEPS3) e 30% (TARG) do carregamento das vigas de contorno da estrutura.

5.1 CONCLUSÕES

Através da metodologia de cálculo foi possível obter traços de betão leve, com características desejadas, como:

- Consistência e trabalhabilidade adequados à painéis pré-fabricados, resultando em betão autoadensável, com bom índice de estabilidade visual (classe IEV 1);
- Massas específicas abaixo dos 2000 kg/m³ que, ao ser comparado com traços convencionais de 2400 kg/m³, garante redução de aproximadamente 30% do peso final de cada painel.

O uso do TEPS estaria viabilizado para uso em painéis pré-fabricados necessitando somente de pequenos ajustes, como redução da espessura do painel, com o objetivo de retirar a faixa com ausência do agregado, visto que diferente do TARG conseguiu atingir todos os objetivos estabelecidos com exceção da homogeneidade em corpos de dimensões maiores.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Pode-se concluir que a pesquisa atingiu parcialmente os objetivos traçados, deixando como objetivo de desenvolvimento futuro, a aplicação dos traços dosados em estruturas com dimensões de uso da industrial, a redução da massa específica dos traços com EPS, e um melhor desenvolvimento do traço com argila expandida como agregado graúdo afim de torná-lo um betão com propriedades consideradas estruturais, ou seja, resistências a compressão acima dos 20 MPa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACKER, Arnold Van. Manual de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto. 2002. [Consult. 25 jan. 2022]. Disponível em: [http://www.ceset.unicamp.br/~cicolin/ST % 20725 % 20A/mpf.pdf](http://www.ceset.unicamp.br/~cicolin/ST%20725%20A/mpf.pdf)>.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C597: Standard test method for ultrasonic pulse velocity through concrete, 2022.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. 2015.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2018.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2011.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro. 2015.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro. 2017.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro. 2008.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11949: Poliestireno expandido para isolamento térmica – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2007.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto – determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro. 2010.

- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro. 2022.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-4: Edificações habitacionais – desempenho – parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro. 2021.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: Concreto autoadensável – parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro. 2017.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: Concreto autoadensável – parte 2: determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual. Rio de Janeiro. 2017.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16475: Painéis de parede de concreto pré-moldado – Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro. 2017.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 2020.
- [17] ASSOCIAÇÃO MERCOSL DE NORMALIZAÇÃO. NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Montevideo. 2000.
- [18] ASSOCIAÇÃO MERCOSL DE NORMALIZAÇÃO. NM 52: Agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Montevideo. 2006.
- [19] ASSOCIAÇÃO MERCOSL DE NORMALIZAÇÃO. NM 53: Agregado graúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente e absorção de água. Montevideo. 2009.
- [20] BARTH, F.; VEFAGO, Luiz M. Tecnologia de Fachadas pré-fabricadas. Editora USFC. 2016.
- [21] BAUER, L.A. Falcão. Materiais de construção – Volume 1. 6. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- [22] BERNARDI, A. C.; FOIATO, M.; ANATER.; PIOVESAN, A. Z.; CARELLI, J. M. Avaliação do Comportamento do Concreto Leve a Partir da Utilização da Argila Expandida como Agregado e Agente de Cura Interna. Congresso Brasileiro do Concreto (CBC). (2019). ISSN 2175-8182.

- [23] CALDERAN, T. C. Análise das propriedades mecânicas do betão leve com a inserção de argila expandida e pérolas de EPS. Presidente Prudente: Centro Universitário Antônio Eufrásio de Toledo de Presidente Prudente, 2019. Trabalho de conclusão de curso.
- [24] CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de betões especiais aplicados na construção civil. CERÂMICA. 55 (2009).
- [25] CARLOS CHASTRE, *et al.* Estruturas Pré-moldadas no Mundo – Aplicações e Comportamento Estrutural, 2012. [Consult. 20 Jan. 2022]. Disponível em: <https://docentes.fct.unl.pt/cmcr/>
- [26] CHRIST, R. Proposição de um método de dosagem para betões de ultra alto desempenho (UHPC). Tese de Doutorado. Universidade do vale do rio dos sinos (Unisinos). Unidade Acadêmica de pesquisa e pós-graduação em engenharia civil. São Leopoldo. 2019.
- [27] ELLIOTT, K. S. – Precast Concrete Structures. 2th ed. Taylor & Francis Group, 2017.
- [28] GOES, C. M. W. Dosagem através do empacotamento de partículas e avaliação do comportamento mecânico de betão de ultra-alto desempenho híbrido. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas. 2022.
- [29] GOES, C. M. W.; KRAHL, P. A.; ALMEIDA, L. C.; TRAUTWEIN, L. M. Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de betão de ultra-alto desempenho. Congresso Brasileiro do Betão (CBC). (2020).
- [30] HUSSAM, M. Precast Concrete - Sustainability LEED.
- [31] LOPES, H. M. T. – Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de betões de cimento Portland. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2019. Dissertação de mestrado.
- [32] LOURENSINI, L. Desenvolvimento de painel pré-fabricado em betão para vedação, com núcleo composto por material para isolamento térmico. Lajeado: Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, 2017. Trabalho de conclusão de curso.
- [33] MARQUES, R.; SCHMITZ, R. J. Comparativo de custos de construção de uma unidade de conjunto habitacional com uso de alvenaria estrutural e painéis pré-fabricados. Revista Destaques Acadêmicos. Lajeado. V. 14, nº 4. ISSN 2176-3070. 2022

[34] MEDEIROS, Jonas Silvestre; MELLO, Murilo Blanco; ROGGERO, Marcus Vinicius Veiga; SEGUNDO, Milton José Pimenta; PIETRANTONIO, Vinicius Brandão. Tecnologia de Vedação e Revestimentos por fachadas. Instituto Aço Brasil. Rio de Janeiro, 2014. [Consult. 25 Jan. 2022]. Disponível em: WWW.URL<<http://www.arq.ufmg.br/biblioteca/wp-content/uploads/2014/11/Tecnologias-de-Veda%C3%A7%C3%A3o-e-Revestimentos-para-Fachadas.pdf>>.

[35] AGUIAR NETO, H. S. Análise comparativa entre betões normais e betões leves para produção e dimensionamento estrutural de edifícios de médio porte. Varginha: Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS/MG). Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/1430>

[36] OLIVEIRA, C. O.; MACIEL, G. F.; CASTRO, A. L.; BARBOSA, M. P.; CAMPOS, R. S. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de betões de alto desempenho. REVISTA MATERIA. 23:01 (2018). [Consult. 25 Jan. 2022]. Disponível em: WWW:<URL:<https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0298>>. ISSN 1517-7076.

[37] OLIVEIRA, L. A.; SABBATINI, F. H. – Tecnologia de painéis pré-fabricados arquitetônicos de concreto para emprego em fachadas de edifícios. São Paulo, 2003 (Dissertação de mestrado). Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil.

[38] SABBATINI, F. H.; FRANCO, L. Notas de aula da disciplina de Tecnologia de produção de vedações verticais – TG 04, MBA, PECE. São Paulo: EPUSP, 2001.

ANEXO A – PLANTA PAVIMENTO TIPO

