

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

TÚLIO HENRIQUE COSTA SOUZA PIMENTA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TRAÇO NA RESISTÊNCIA DE UM CONCRETO
FAST TRACK PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Joinville

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

TÚLIO HENRIQUE COSTA SOUZA PIMENTA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TRAÇO NA RESISTÊNCIA DE UM CONCRETO
FAST TRACK PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Daniel Hastenpflug

Joinville

2021

TÚLIO HENRIQUE COSTA SOUZA PIMENTA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TRAÇO NA RESISTÊNCIA DE UM CONCRETO
FAST TRACK PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 20 de setembro de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Hastenpflug
Orientador/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Breno Salgado Barra
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo sustento, misericórdia e bondade comigo todos os dias.

À toda a minha família, em especial aos meus pais Geraldo Amélio de Souza e Alzira da Costa Souza, por me ensinar desde cedo os primórdios da vida que são: amor, educação e trabalho.

À minha tia e irmã Priscila de Souza Caldas, por todo o apoio e conselhos durante toda a minha vida.

Agradeço ao meu professor, orientador e amigo Dr. Daniel Hastenpflug por todo auxílio e incentivo neste trabalho, e também por todos os momentos vividos durante a minha graduação.

Também agradeço ao meu professor e amigo Dr. Yader Guerrero por toda a amizade desenvolvida durante esses anos.

Aos amigos que conheci durante minha graduação, agradeço por cada momento compartilhado e todos os conselhos durante essa jornada. De uma forma muito especial gostaria de deixar meu muito obrigado aos amigos Bruna Sell, Vinícius Hunzicker, Vinícius Krause, Felipe Muchalovski, Murilo Sabka, José Victor, Ruan Xavier, Rafael Damasceno e Rafael Fronza por terem me ajudado na execução deste trabalho.

Gostaria de agradecer especialmente a Dailiane, uma grande amiga que fiz durante esse tempo. Muito obrigado por sua ajuda e conselhos que foram necessários para eu chegar até aqui.

Também agradeço a todos os amigos que fiz na Equipe InfraTEC. Grupo em que tenho muito orgulho de ter feito parte, no qual aprendi muitos conceitos teóricos através da execução dos protótipos geotécnicos.

A empresa Marcos Trojan Engenharia e Geotecnia LTDA pela liberação do espaço físico para o rompimento dos corpos de prova.

Agradeço a empresa Cimentos Itambé pela concessão do cimento do tipo CP-V, e também a empresa Infrasul por conceder o agregado miúdo para a execução dos traços experimentais desse trabalho.

Ao André da empresa Liga Química por conceder o aditivo Liga Flow 047.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

Com o intuito de desenvolver um pavimento com uma rápida liberação do tráfego para os veículos, o pavimento de concreto *Fast Track* apresenta-se como uma alternativa, sendo que a alta resistência inicial em poucas horas é sua principal característica. Para isto é necessário o controle de qualidade das propriedades do concreto em seu estado fresco e endurecido a fim de monitorar a resistência final destes pavimentos, principalmente em relação a resistência à tração na flexão, para que seja possível a liberação dos veículos com segurança. Para a realização do trabalho foi determinado uma curva de dosagem, empregando o Método do IPT/EPUSC/IBRACON. Para o traço piloto tomou-se como base o concreto fast track empregado para a construção de trecho da BR 290 (*Free-Way*). Para a verificação das propriedades dos concretos da curva, foram moldados um total de 4 corpos de prova para realizar o ensaio de resistência de tração na flexão nas idades de 12 e 24 horas, respectivamente. A partir da curva, realizou-se um concreto de resistência de 2,5 MPa da tração na flexão. Para este traço foi moldado um total de 20 corpos de prova, sendo 12 para a tração na flexão, 8 para a compressão axial e 3 para os índices físicos, sendo que as idades de rompimento foram, a saber: 12 horas, 24 horas, 7 dias e 28 dias. A fim de melhorar o empacotamento dos agregados no traço referência utilizou-se o método teórico de Füller-Talbot, que proporciona uma melhor distribuição granulométrica conforme a utilização proporcional de material retido em cada peneira da série normal. Com isso realizou-se duas formulações deste método, sendo uma com maior quantidade de finos e outra com granulometria mais graúda. Para ambos foi moldado a mesma quantidade de corpos de prova e com as mesmas idades de rompimento. Segundo os resultados deste trabalho, apenas o traço referência apresentou resultados satisfatórios para aplicações do concreto *Fast Track* em 12 horas, os traços dosados pelo método de Füller-Talbot não apresentaram a resistência mínima da tração na flexão exigida para este tipo de concreto nessa idade de cura, entretanto para 28 dias este método propôs melhores resultados nos ensaios de resistência.

Palavras-Chaves: Pavimentos de concreto. Fast Track. Resistência à compressão axial e a tração na flexão. Método IPT. Método de Füller-Talbot.

ABSTRACT

In order to develop a pavement with a quick release of traffic to vehicles, the Fast Track concrete pavement presents itself as an alternative, and the high initial resistance in a few hours is its main characteristic. For this it is necessary to control the quality of the properties of concrete in its fresh and hardened state in order to monitor the final strength of these pavements, especially in relation to the tensile strength in bending, so that the release of vehicles safely is possible. To carry out the work, a dosage curve was determined using the IPT/EPUSC/IBRACON method. The fast track concrete used for the construction of a stretch of the BR 290 (Free-Way) was used as the basis for the pilot trace. To verify the properties of the curved concretes, a total of 4 specimens were cast to perform the flexural tensile strength test at the ages of 12 and 24 hours, respectively. From the curve, a concrete with a tensile strength of 2.5 MPa in bending was made. A total of 20 specimens were molded for this mix, 12 for flexion traction, 8 for axial compression and 3 for physical indices. 7 days and 28 days. In order to improve the packing of aggregates in the reference mix, the theoretical method of Füller-Talbot was used, which provides a better particle size distribution according to the proportional use of material retained in each sieve of the normal series. Thus, two formulations of this method were carried out, one with a greater amount of fines and the other with a coarser particle size. For both, the same amount of specimens and with the same breakage ages were molded. According to the results of this work, only the reference mix showed satisfactory results for Fast Track concrete applications in 12 hours, the mixes dosed by the Füller-Talbot method did not present the minimum flexural tensile strength required for this type of concrete at this age of cure, however for 28 days this method proposed better results in resistance tests.

Keywords: Concrete pavements. Fast Track. Resistance to axial compression and flexion traction. IPT Method. Füller-Talbot Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de pavimentos.	16
Figura 2 – Estrutura tipo do pavimento flexível.	18
Figura 3 – Seção transversal de um pavimento flexível.	19
Figura 4 – Estrutura tipo pavimento semirrígido.	20
Figura 5 – Estrutura tipo do pavimento rígido.	21
Figura 6 - Comportamento tensão-deformação do concreto e dos seus materiais constituintes.	29
Figura 7 - Metodologia da pesquisa.	39
Figura 8 - Materiais utilizados: a) cimento, b) areia industrial, c) brita 0, d) brita 1.	40
Figura 9 - Peneiras utilizadas para o ensaio de granulometria.	42
Figura 10 - Picnômetro.	43
Figura 11 - Gráfico para realizar a dosagem do concreto <i>Fast Track</i>	50
Figura 12 - Peneiras utilizadas para o método de Füller-Talbot.	52
Figura 13 – Material retido nas peneiras: 12,7 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,8 mm.	54
Figura 14 - Material retido nas peneiras: 2,2 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.	54
Figura 15 - Betoneira de 120 litros.	55
Figura 16 - Equipamentos do <i>Slump Test</i>	56
Figura 17 - Cilindro metálico para a determinação da massa específica do concreto.	57
Figura 18 - Corpos de prova para os ensaios de compressão e flexão.	59
Figura 19 - Máquina de ensaios para a resistência à compressão simples.	61
Figura 20 - Máquina de ensaios para a resistência à tração na flexão.	62
Figura 21 - Ruptura fora do terço médio.	63
Figura 22 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.	65
Figura 23 - Curva granulométrica do agregado miúdo.	65
Figura 24 - Composição granulométrica do Traço B.	67
Figura 25 - Composição granulométrica do Traço C.	68
Figura 26 - Composição granulométrica dos Traços A, B e C.	69
Figura 27 – Abatimento do concreto: a) Traço – TREF, b) Traço Intermediário – TI, c) Traço Rico – TR, d) Traço A, e) Traço B, f) Traço C.	71
Figura 28 - Massa específica aparente para cada formulação.	73

Figura 29 - Teor de ar incorporado para cada formulação.	73
Figura 30 - Correlação entre a massa específica aparente e o teor de ar incorporado.	74
Figura 31 - Absorção de água para cada formulação.	75
Figura 32 - Índice de vazios para cada formulação.	75
Figura 33 - Massa específica para cada formulação.	76
Figura 34 - Corpos de prova rompidos na compressão axial na idade de 12 horas: a) Traço A, b) Traço B, c) Traço C.	77
Figura 35 - Valores obtidos para o ensaio de compressão axial.	77
Figura 36 - Corpos de prova rompidos à tração na flexão na idade de 12 horas: a) Traço A, b) Traço B, c) Traço C.	79
Figura 37 - Valores obtidos para o ensaio de tração na flexão.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de cimento e suas composições em massa.	25
Quadro 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.	25
Quadro 3 - Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.	25
Quadro 4 - Classificação dos agregados quanto ao módulo de finura.	26
Quadro 5 - Valores de ensaio de acordo com a consistência.	27
Quadro 6 - Fatores que influenciam na determinação da resistência à compressão do concreto.....	30
Quadro 7 - Exemplos de Traços de Pavimentos de Concreto.	33
Quadro 8 - Caracterização das propriedades físicas do cimento CPV-ARI.	41
Quadro 9 - Composição do cimento Portland do tipo CPV-ARI.	41
Quadro 10 - Quantidade de material utilizado para cada traço.	47
Quadro 11 - Traços unitários e consumos de cimento.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições e classes para o Método IPT/EPUSC/IBRACON.	51
Tabela 2 - Equações utilizadas para o cálculo das propriedades físicas do concreto no estado fresco.	58
Tabela 3 - Equações utilizadas para o cálculo das propriedades físicas do concreto no estado endurecido.	60
Tabela 4 - Tolerância para a idade do ensaio.	61
Tabela 5 - Fator de correção h/d.	62
Tabela 6 - Resultados obtidos através do ensaio de granulometria para o agregado graúdo.	64
Tabela 7 - Valores obtidos através do ensaio de granulometria para o agregado miúdo.	65
Tabela 8 - Composição do percentual de massa passante nas peneiras.	66
Tabela 9 - Valores das massas específicas dos agregados graúdos.	69
Tabela 10 - Valores das massas específicas do agregado miúdo.	70
Tabela 11 - Valores das massas unitárias dos agregados.	70
Tabela 12 - Valores obtidos no ensaio do <i>Slump Test</i>	72
Tabela 13 - Valores obtidos no ensaio.	72
Tabela 14 – Valores obtidos no ensaio.	74
Tabela 15 - Valores obtidos para o ensaio de compressão axial.	76
Tabela 16 - Valores obtidos para o ensaio de tração na flexão.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Água/cimento

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACPA - *American Concrete Pavement Association*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

C₃A - Aluminato tricálcio

C₃S - Silicato tricálcio

CP - Corpo de prova

cm - Centímetros

cm²/g - Centímetros quadrado/grama

CNT - Confederação Nacional de Transporte

dm³ - Decímetros cúbicos

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

FHWA - *Federal Highway Administration*

g - Gramas

g/cm³ - Gramas/Centímetros cúbicos

h/d - Altura/diâmetro

kg - Quilos

kg/m³ - Quilos/Metros Cúbicos MPa

N - Newton

NBR - Norma Brasileira

mm – Milímetros

mL - Mililitros

m³ - Metros cúbicos

MPa - Megapascal

MPa/min – Megapascal/minuto

SC - Santa Catarina

TREF - Traço Referência

TI - Traço Intermediário

TR - Traço Rico

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

µm - Micromilímetros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS	16
2.1	PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	17
2.2	PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS	19
2.3	PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	20
3	CONCRETO	24
3.1	PROPRIEDADES DO CONCRETO	26
3.1.1	Propriedade no estado fresco	26
3.1.2	Propriedade no estado endurecido	28
4	CONCRETO <i>FAST TRACK</i>	31
4.1	MATERIAIS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO <i>FAST TRACK</i>	35
4.1.1	Cimento	35
4.1.2	Agregados	36
4.1.3	Água	37
4.2	PROCESSO CONSTRUTIVO.....	37
5	MATERIAIS E MÉTODOS	39
5.1	MATERIAIS.....	40
5.1.1	Água	40
5.1.2	Cimento	41
5.1.3	Agregados	41
5.1.3.1	Distribuição granulométrica	42
5.1.3.2	Massa específica do agregado miúdo.....	43
5.1.3.3	Massa específica do agregado graúdo	45
5.1.3.4	Massa unitária.....	46
5.2	DOSAGEM DO CONCRETO	47
5.2.1	Método teórico - Füller-Talbot	52
5.2.2	Mistura do material	55
5.3	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	56
5.3.1	Ensaio no estado fresco	56

5.3.1.1	<i>Slump Test</i>	56
5.3.1.2	Determinação da massa específica aparente, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico	57
5.3.1.3	Moldagem dos corpos de prova	58
5.3.2	Ensaio no estado endurecido	59
5.3.2.1	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	59
5.3.2.2	Resistência à Compressão Axial	60
5.3.2.3	Resistência à Tração na Flexão	62
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	64
6.1.1	Distribuição granulométrica dos agregados	64
6.1.2	Método teórico - Füller-Talbot.....	66
6.1.3	Massa específica do agregado graúdo	69
6.1.4	Massa específica do agregado miúdo.....	69
6.1.5	Massa unitária dos agregados.....	70
6.2	CONCRETO <i>FAST TRACK</i>	70
6.2.1	Ensaio no estado fresco.....	70
6.2.1.1	<i>Slump Test</i>	70
6.2.1.2	Determinação da massa específica aparente, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico	72
6.2.2	Ensaio no estado endurecido	74
6.2.2.1	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	74
6.2.2.2	Resistência à Compressão Axial	76
6.2.2.3	Resistência à Tração na Flexão	79
7	CONCLUSÃO	82
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Fundação Dom Cabral (2017), 75,9% da produção do Brasil é transportada através da malha rodoviária, seguida da via marítima com cerca de 9,2%. O restante é escoado pelas vias aérea (5,8%), ferroviária (5,4%), cabotagem (3,1%) e hidroviária (menos de 1%). Através destes dados, as rodovias brasileiras estão diretamente ligadas ao desenvolvimento econômico e social do país (CARVALHO, 2012).

De acordo com a Confederação Nacional de Transporte (CNT) (2017), das rodovias brasileiras, 12,3% dessas (211.468 km de 1.720.756 km) são pavimentadas. Destas, 99% das rodovias brasileiras são executadas com pavimento flexível.

Analisando a durabilidade do pavimento das vias brasileiras, estas não apresentam uma grande durabilidade. Segundo a CNT, algumas razões para que os pavimentos flexíveis no Brasil não serem duráveis são:

1. Destinação insuficiente de recursos para obras de construção, fiscalização e manutenção de rodovia;
2. Problemas na manutenção preventiva dos pavimentos;
3. Ausência de uma política de gerenciamento dos pavimentos e de planejamento de manutenção;

Diante dos fatos apresentados, surge então a proposta do pavimento de cimento Portland para segmentos rodoviários com intenso tráfego. De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes (DNIT) (2005), o pavimento de concreto já é utilizado em locais que exigem maiores esforços de utilização do pavimento rígido, a saber: corredores de ônibus, pontes, aeroportos, viadutos e portos, por exemplo.

Entretanto, é possível afirmar que este tipo de pavimento não é largamente empregado devido a disparidade de custos na fase inicial de implementação nos pavimentos rígidos, porém o desempenho ao longo dos anos é extremamente superior (RHEINHEIMER, 2007). De acordo com Hendrikx (1998), outra dificuldade da utilização deste tipo de concreto é o tempo necessário para que o material

cimentício alcance as resistências mecânicas mínimas para a liberação do tráfego, sendo assim aconselha-se a utilização de cimentos com alta resistência inicial.

Como alternativa, desenvolveu-se o concreto *Fast Track*, que é utilizado em pavimentos rígidos cuja finalidade é de uma rápida liberação do tráfego em poucas horas.

Frente o discutido anteriormente, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver traços de concreto *Fast Track* para a construção de pavimentos como alternativa para melhorar a qualidade da malha rodoviária brasileira. Também, divulgar as suas vantagens e desvantagens, tipos e traços de concreto adaptáveis conforme a necessidade de cada obra.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo desenvolver traços de concreto para a utilização em pavimentos de alta resistência inicial para pavimentos rígidos de concreto do tipo *Fast Track*. Avaliar-se-á as propriedades físicas nos estados fresco e endurecido, bem como as principais características, vantagens e desvantagens.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir parâmetros para desenvolvimento de traços para o concreto *Fast Track* empregando materiais comercializados em Joinville/SC;
- Avaliar das propriedades física de compressão axial, tração na flexão e índices físicos do concreto *Fast Track* no estado endurecido;
- Estudar a influência da distribuição granulométrica dos agregados e do tamanho das partículas nas propriedades do estado fresco e no estado endurecido.

2 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

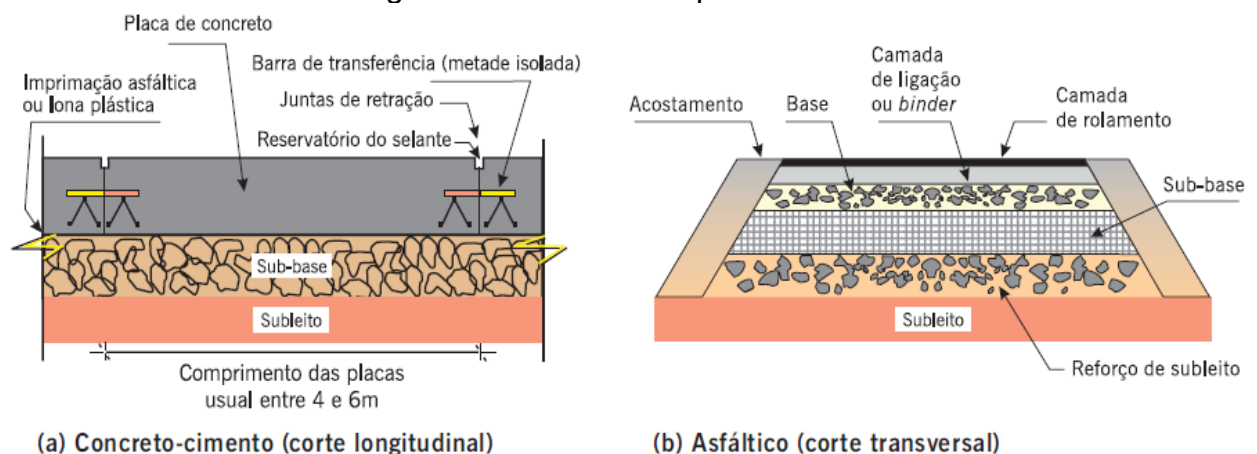
Segundo a NBR 7207 (ABNT, 1982) e Bernucci (2006), o pavimento pode ser classificado como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construídas sobre a superfície final da terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços verticais e horizontais oriundos do tráfego de veículos e do clima. Estas camadas têm o intuito de propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

A condição do pavimento está associada com o estado da superfície de rolamento. A durabilidade das camadas de rolamento depende de alguns fatores, tais como: intensidade do tráfego, intempéries climáticas, estruturas do pavimento e manutenção ao longo dos anos (MENDES e NUNES, 2009).

Pesquisas recorrentes da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2005), estima-se que cerca de 1 a 2 bilhões de reais são gastos com a manutenção das rodovias brasileiras ao ano. Ainda, o Brasil deveria investir aproximadamente cerca de 10 bilhões de reais anuais para que se mantenha a conservação da qualidade dos pavimentos da malha rodoviária brasileira.

Tradicionalmente, o pavimento rodoviário pode ser classificado em dois tipos: rígidos, também conhecido como concreto-cimento e em que a camada de rolamento funciona também como estrutura (Figura 1a), e flexíveis no qual apresenta uma camada superficial asfáltica que absorve e distribui a carga dinâmica referentes às pressões concentradas (Figura 1b) (BERNUCCI, 2006).

Figura 1 – Estrutura de pavimentos.



Fonte: Bernucci (2006).

De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) (2006), o pavimento também pode ser classificado como semirrígido. Pavimento em que a base é cimentada com algum aglutinante com propriedades cimentícias, como a camada de solo cimento revestida com uma camada asfáltica, por exemplo.

Ainda referente ao Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), a estrutura do pavimento de uma rodovia consiste na subdivisão de cinco camadas, são elas:

- Subleito: é a primeira camada da estrutura do pavimento, consiste em um maciço de terra em que representará a fundação para todas as camadas superiores;
- Reforço de subleito: essa camada é construída com um material com uma granulometria granular cujo objetivo é melhorar a capacidade de suporte de carga do subleito e, conseqüentemente, reduzir a espessura da base;
- Sub-base: tem como função o melhoramento do subleito e é executada apenas quando, por questões econômicas, objetiva-se a redução da espessura da base;
- Base: camada destinada a resistir aos esforços oriundos do trânsito de veículos;
- Revestimento: camada superior da estrutura do pavimento. Esta recebe todas as cargas verticais e horizontais dos veículos e tem o intuito de melhorar a trafegabilidade, conforto e segurança dos motoristas.

2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A estrutura tipo do pavimento flexível (Figura 2), refere-se a um pavimento que consiste por uma ou mais camadas de misturas betuminosas aglutinantes sobrepostas sobre as camadas granulares adjacentes. A fundação é uma camada de solo compactado que suporta as camadas anteriores.

Com a aplicação dos carregamentos verticais oriundos dos veículos nos pavimentos flexíveis, a deformação característica nesse material é a elástica, desse modo a carga aplicada na superfície será igual nas camadas adjacentes: base, sub-base, reforço de subleito e subleito (DNIT, 2006).

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), os agregados utilizados nos pavimentos flexíveis representam um percentual entre 90% a 95% do revestimento, esta camada é a principal no requisito de suporte e transmissão das cargas aplicadas verticalmente pelos veículos e resistência de todos os desgastes devido às solicitações. O material asfáltico por sua vez representa uma porcentagem entre 5% a 10% do revestimento, sendo que suas principais funções são, a saber: aglutinação e impermeabilização.

Segundo Senço (2007), os pavimentos flexíveis são aqueles que as deformações são elásticas e que não sofrerão o rompimento, até o limite de escoamento. Normalmente são dimensionados através da compressão e da tração na flexão.

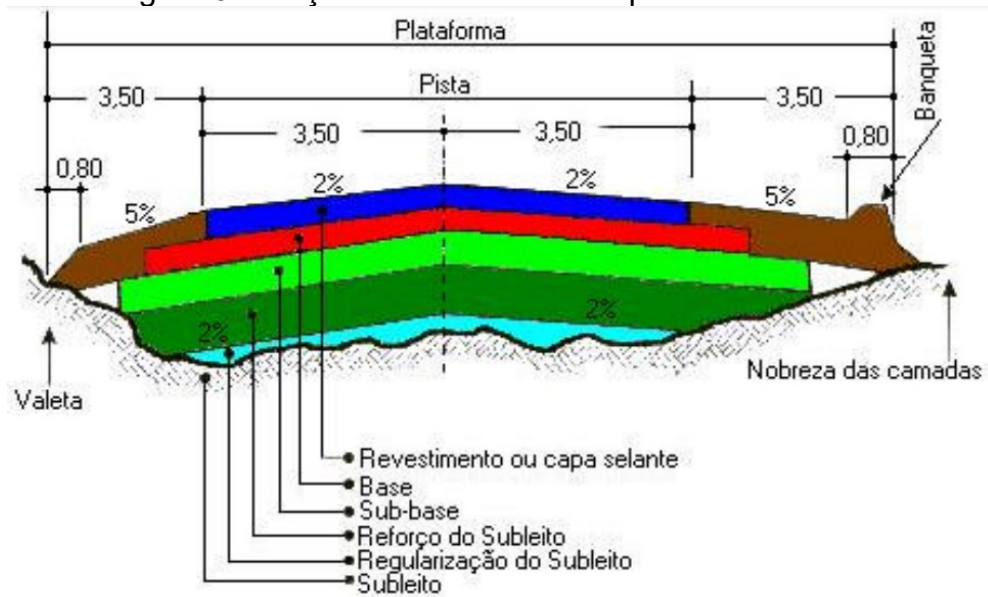
Figura 2 – Estrutura tipo do pavimento flexível.

	Tipo de Material	Tipo de Camada
Pavimento	Misturas Betuminosas	Camada de Desgaste
	Misturas Betuminosas	Camada de Regularização
	Misturas Betuminosas Materiais Granulares	Camada de Base
	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Camada de Sub-Base
Fundação	Materiais Granulares solos Tratados Solos Seleccionados	Leito do Pavimento
	Aterro Terreno Natural	

Fonte: Silva (2009).

Para Marques (2002), o pavimento flexível contém sete camadas, a saber: revestimento ou capa selante, base, sub-base, reforço do subleito, regularização do subleito, subleito e fundação do subleito. Na Figura 3 tem-se um exemplo de uma seção típica de um pavimento flexível.

Figura 3 – Seção transversal de um pavimento flexível.



De acordo com Silva (2009), os pavimentos flexíveis são feitos, majoritariamente, de duas maneiras. Eles podem possuir misturas betuminosas fabricadas a quente ou a frio. Para Bernucci *et al.* (2010), a mistura para o pavimento asfáltico usinado a quente é feita em uma usina estacionária e, através de caminhões específicos para o transporte dessa mistura com elevadas temperaturas (150°C a 185°C), o composto betuminoso é levado até o local da obra. As misturas fabricadas a quente são fabricadas para que ao menos o componente, agregado ou betume seja aquecido.

Silva (2009, p. 6) afirma que,

As misturas betuminosas fabricadas a frio são produzidas, espalhadas e compactadas sem aquecimento dos materiais e são compostas por agregados aos quais se junta uma emulsão betuminosa (ligante), podendo, ainda, adicionar-se água e aditivos. Estas misturas são, geralmente, aplicadas em camadas de pavimento onde as solicitações não são significativas.

2.2 PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS

De acordo com o DNIT (2006), o pavimento semirrígido caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica. Nesse caso o solo-cimento é restritamente adequado apenas na utilização para o

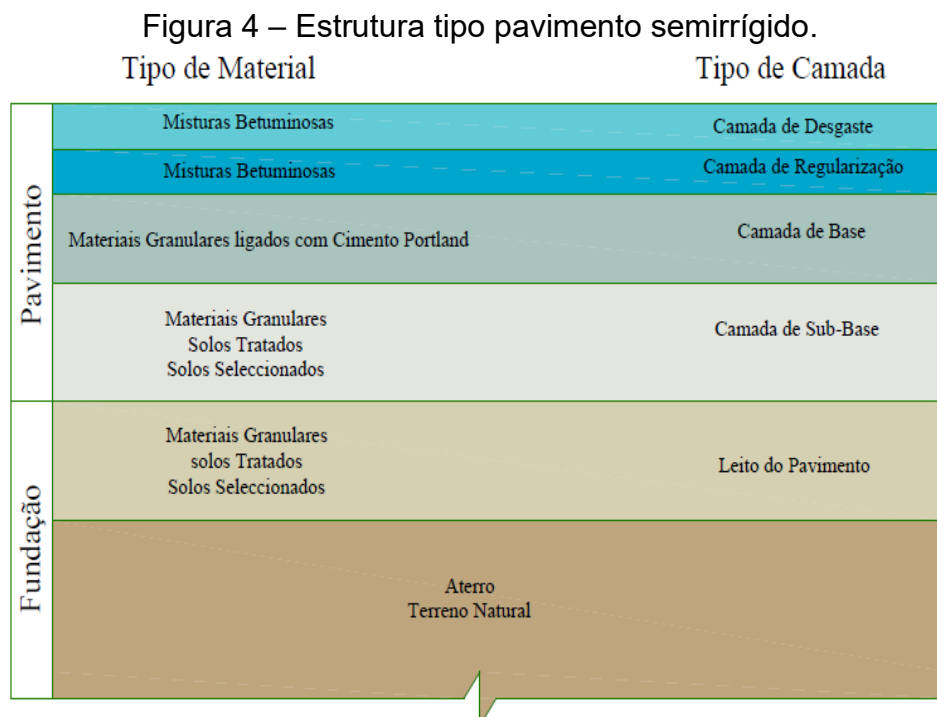
uso de bases e/ou sub-bases, porque apresenta um custo inicial de aplicação baixo e uma boa durabilidade ao longo dos anos.

Segundo Battagin (2009), é incomum a utilização de resíduos na sub-base de dos pavimentos porque é necessário que se tenha um bom controle tecnológico do concreto. Por esse principal motivo, o concreto utilizado na sub-base é um material de boa qualidade, com apenas agregados miúdos, graúdos, cimento e aditivos, se necessário.

Para Paixão *et al.* (2017, p. 139),

Pavimentos Semirrígidos também são revestidos de material asfálticos. O que diferencia um do outro é a presença de ligantes hidráulicos (cimento Portland ou cal hidratada) em sua base, com o intuito de se alcançar uma camada com rigidez suficiente para resistir às cargas de tráfego de projeto. A adição dos ligantes hidráulicos pode ser em diversos materiais, cada um com características próprias.

É considerado um pavimento semirrígido quando se encontra uma base cimentada abaixo do revestimento betuminoso (MEDINA, 1997), conforme ilustrado na Figura 4.



Fonte: Silva (2009).

2.3 PAVIMENTOS RÍGIDOS

Para Oliveira (2000, p. 5),

Os pavimentos rígidos podem ser construídos com concreto simples, armado, protendido, com adição de fibras, com concreto rolado ou com concreto de alta resistência. Podem ser apoiados sobre o solo, sobre a sub-base, ou sobre pavimentos antigos, de concreto ou de asfalto.

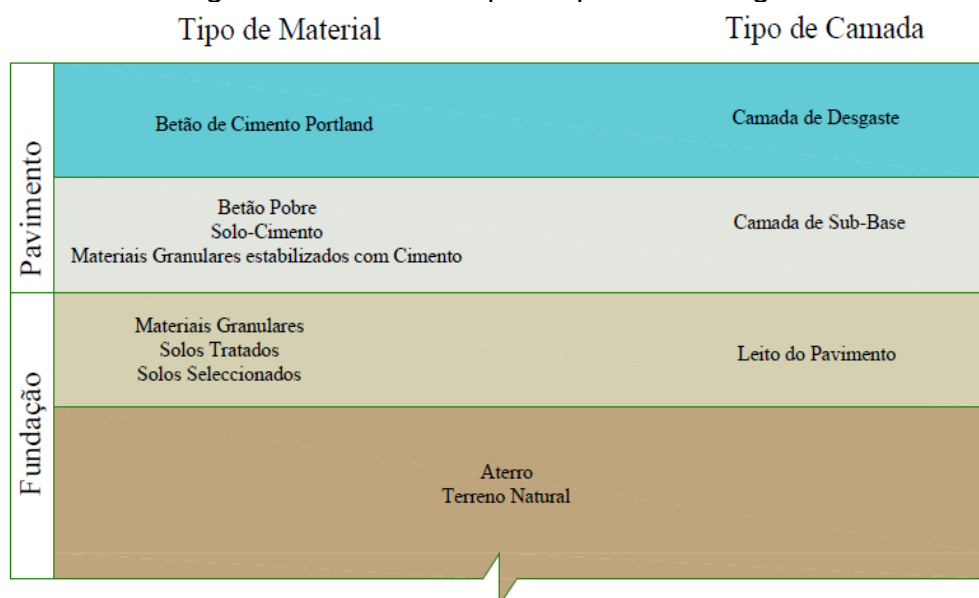
De acordo com o DNIT (2006), o revestimento do pavimento rígido possui uma alta rigidez comparada com as camadas inferiores e, por esse motivo, todas as tensões verticais são absorvidas na superfície de concreto, diferentemente dos pavimentos flexíveis no qual o bulbo de tensões alcançará o subleito.

Para Senço (2007), os pavimentos rígidos são aqueles que terão pouca deformação em relação aos pavimentos flexíveis, e sua ruptura se dará devido à tração na flexão. Ainda de acordo com Balbo (2009), as placas do pavimento rígido terão a função de revestimento e base em um mesmo instante, podendo ser armadas com barras de aço.

Segundo o DNIT (2005), nas obras de concreto rígido da malha rodoviária brasileira, os cimentos Portland mais utilizados são: CP - I, CP - II, CP - III e CP - IV. Ainda de acordo com o Manual dos Pavimentos Rígidos, recomenda-se que os agregados graúdos e miúdos sigam uma curva granulométrica contínua.

De acordo com Silva (2009), a estrutura tipo do pavimento rígido pode ser ilustrada conforme a Figura 5.

Figura 5 – Estrutura tipo do pavimento rígido.



Fonte: Silva (2009).

Balbo (2004), destaca que o revestimento de concreto para a aplicação do pavimento rígido pode ser elaborado de duas principais maneiras, a saber: pré-moldado ou produção *in loco*; e que nas rodovias brasileiras o pavimento de concreto simples (PCS) é o mais utilizado nas obras de infraestrutura rodoviária.

Conforme Balbo (2009), atualmente os tipos de pavimento de concreto são:

- 1) **Pavimento de Concreto Simples (PCS):** É um concreto de alta resistência comparado com os concretos convencionais para estruturas por exemplo e, por não possuir armadura de aço, é capaz de suportar os esforços de tração na flexão gerados através dos carregamentos verticais dos veículos. As juntas serradas de contração têm a função de reduzir os problemas ocasionados pela retração do pavimento;
- 2) **Pavimento de Concreto Armado (PCA):** As armaduras têm a função de receber e distribuir as cargas de tração dos carregamentos e, conseqüentemente, o concreto nesse tipo de pavimento, trabalha em regime de compressão sem sofrer esmagamento. Há a presença das juntas serradas na construção do PCA também, mas em comparação com o PCS, elas são mais espaçadas porque a dilatação dos materiais é maior nesse pavimento;
- 3) **Pavimento de Concreto com Armadura Contínua (PCAC):** A armadura de aço nesse tipo de pavimento é contínua, isto é, as conexões entre as barras devem ser unidas através de soldas, grampos, estribos, dentre outros. A aplicação da armadura nesse caso é um pouco acima da linha neutra da seção transversal, com o propósito de manter as faces fissuradas majoritariamente unidas;
- 4) **Pavimento de Concreto Protendido (PCPRO):** Pelo fato das peças de concreto receberem uma carga inicial de compressão, é possível trabalhar com placas de grandes dimensões e menores espessuras;
- 5) **Pavimento de Concreto Pré-Moldado (PCPM):** As placas de concreto pré-moldadas são fabricadas em empresas especializadas nesse tipo de serviço. São construídas sob medida e utilizadas para a substituição de placas em pavimentos danificados;
- 6) **Whitetopping (WT):** É uma nova camada de revestimento aplicada sobre os pavimentos já existentes que não se encontram em bom estado de conservação. Essa camada pode ser em PCS, PCA, PCAC, PCPRO ou PCPM.

7) **Whitetopping Ultradelgado (WTUT):** Nesse tipo de revestimento, as placas de pequenas dimensões exercem função de flexão e deflexão, e apresentam uma elevada resistência. As juntas de contração são serradas e apresentam pequenos espaçamentos.

De acordo com Rheinheimer (2007), os pavimentos de concreto são benéficos em diversos fatores, sendo eles:

- Devido a facilidade de deslocamento nos pavimentos de concreto pelo fato da superfície ser mais lisa em relação aos pavimentos flexíveis, a economia de combustíveis em caminhões pode ser em até 20%;
- A economia de energia elétrica pode chegar a 60%, porque a cor mais clara do pavimento favorece a iluminação das vias e, conseqüentemente, o consumo sustentável de energia;
- Por conseqüência do maior atrito da superfície de concreto com os pneus, a redução da distância de frenagem será muito menor em relação aos pavimentos flexíveis;
- Baixa permeabilidade e alta durabilidade por apresentar alta resistência mecânica diante das cargas verticais dinâmicas;
- A velocidade de escoamento da água para as canaletas laterais é majoritariamente maior em comparação com a superfície de asfalto, sendo assim a resistência para que não ocorra a hidroplanagem será maior.

3 CONCRETO

De acordo com Neville e Brooks (2013), o concreto pode ser caracterizado como o resultado da mistura entre água, cimento, agregados graúdo e miúdo. Ainda em sua composição, pode conter algumas adições minerais que exercem a função de adição ou substituição do cimento, como a sílica ativa, escória de alto forno, cinzas volantes, filler calcário e metacaulim, por exemplo. Aditivos químicos, polímeros e fibras, também podem ser utilizados para a fabricação de concretos.

Em termos globais, o consumo anual de concreto é estimado em 11 bilhões de toneladas (ISAIA, 2005). Para Isaia (2011), esse alto consumo de concreto anual pode ser explicado porque apresenta propriedades de resistência, multifuncionalidade, trabalhabilidade, desempenho e durabilidade que, ao longo dos anos, resultará em uma vida útil de projeto considerável com um custo acessível.

O cimento Portland é o principal material utilizado em obras mundiais. Este composto é caracterizado pelas propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água e que, do ponto de vista químico, é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos e argamassas no produto final desejado (ABCP, 2002).

O cimento Portland é composto pelo clínquer e adições. De acordo com a ABCP (2002), o clínquer é o ligante mais importante do cimento, porque desenvolve uma reação química em presença de água com elevada resistência e durabilidade. As adições são matérias-primas que misturadas ao clínquer na fase de moagem, que permitem a variedade dos tipos de cimento Portland para comercialização. Algumas outras adições podem ser realizadas no processo de fabricação do cimento, variando o tipo final do cimento comercial, conforme o Quadro 1.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio da NBR 7211 (ABNT, 2009), classifica os agregados em miúdos e graúdos, sendo que a classificação é realizada através da quantidade de material passante e retido nas malhas das peneiras das séries normal e intermediária. A classificação de agregado miúdo de acordo com a norma, é do material cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e retidos na de 150 μ m. O agregado graúdo é o material passante na peneira de abertura de 75 mm e retidos na de 4,75 mm.

Quadro 1 - Tipos de cimento e suas composições em massa.

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-			NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14		
	CP II-F	94-90		-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-			15-50
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-			NBR 5733

Fonte: Adaptado de ABCP (2002).

No Quadro 2 e Quadro 3, estão representados os limites de distribuição granulométrica para os agregados miúdos e graúdos.

Quadro 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
9,5 mm	0			
6,3 mm	0			
4,75 mm	0		5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 NOTA 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 NOTA 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Quadro 3 - Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-				0 - 5
63 mm	-				5 - 30
50 mm	-			0 - 5	75-100
37,5 mm	-			5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-		0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	5 - 25	5 - 25	87 - 100	-
19 mm	-	65 - 95	65 - 95	95 - 100	
12,5 mm	0 - 5	92 - 100	92 - 100	-	
9,5 mm	2 - 15	95 - 100	-		
6,3 mm	40 - 65				
4,75 mm	80 - 100	-			

2,36 mm	95 - 100	-
^a Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.		

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Os agregados podem ser classificados de acordo com o seu respectivo módulo de finura, através do ensaio de granulometria. De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), o Módulo de Finura é o valor da soma das percentagens retidas acumuladas nas peneiras de série normal dividido por 100. Esse método é mais utilizado para a caracterização dos agregados miúdos.

Quadro 4 - Classificação dos agregados quanto ao módulo de finura.

Classificação	Módulo de Finura (MF)
Finas	$1,55 < MF < 2,20$
Médias	$2,20 < MF < 2,90$
Grossas	$2,90 < MF < 3,50$

Fonte: Neville e Brooks (2013).

3.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO

3.1.1 Propriedade no estado fresco

A trabalhabilidade é a principal propriedade do concreto no estado fresco. Para a ASTM C 125-93 (1993), a trabalhabilidade é a energia necessária para manipular o concreto fresco sem perda considerável da homogeneidade desde a mistura até o acabamento. É importante que se mantenha a qualidade das propriedades do concreto fresco, para que o projeto esteja de acordo com os parâmetros de estabilidade e durabilidade preestabelecidos na fase de projeto. De acordo com Isaia (2005), a trabalhabilidade deve permitir que as etapas de transporte, de lançamento, de adensamento e de acabamento, sejam realizadas e que o concreto se mantenha homogêneo, fluido e coeso de acordo com as condições iniciais do projeto.

A consistência do concreto é a maior ou menor facilidade do composto cimentício deformar-se sob ação de solicitações, e está relacionada com a mobilidade da massa e também é altamente influenciada pela coesão (MEHTA E MONTEIRO, 1994). A consistência do concreto, através do ensaio de abatimento do

tronco de cone (*Slump Test*) realizado de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), é o parâmetro responsável para fornecer importantes informações sobre as propriedades do concreto no estado fresco. O resultado desse ensaio é o índice de consistência.

Petrucci (1971) apresenta indicações sobre limites dos índices de trabalhabilidade, conforme consta no Quadro 5.

Quadro 5 - Valores de ensaio de acordo com a consistência.

Consistência	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)
Extremamente seca	-	-
Muito seca	-	-
Seca	0 – 2	< 120
Rija	2 – 5	350 - 400
Plástica (média)	5 – 12	400 - 500
Úmida	12 – 20	500 - 600
Fluida	20 – 25	> 600

Fonte: Adaptado de Petrucci (1971).

Segundo Isaia (2005), alguns fatores podem alterar a trabalhabilidade do concreto fresco. Alterando um ou mais desses fatores, haverá mudanças na fluidez ou na coesão ou em ambas as características. Dentre esses fatores, pode-se destacar:

- **Consumo de água:** É um dos principais fatores que afetam a trabalhabilidade, porque quanto maior o consumo de água mais fluido é o concreto e, conseqüentemente, menor a consistência e coesão;
- **Agregados:** Para que um concreto seja trabalhável e tenha coesão, é necessário um percentual mínimo de material passante na peneira 0,3 mm (material fino). No caso de um concreto com alto consumo de cimento, os agregados com menos finos podem ser utilizados em até 27%;
- **Consumo de cimento:** Para baixos teores do consumo de cimento, o concreto será caracterizado como pobre e dificultará a etapa de acabamento porque normalmente é áspero em sua superfície. Por outro lado, o concreto rico, com alto teor de cimento, embora seja muito coesivo, tende a ser viscoso;
- **Relação água/cimento e relação agregado/cimento:** O teor de argamassa nas dosagens de concreto é proporcional à coesão. Isto é, quanto maior o

aumento do teor de agregado/cimento, maior será a quantidade de água para que se tenha uma mesma consistência;

- **Adições:** Pozolanas tendem a aumentar a coesão e a diminuir a trabalhabilidade, como é o caso da cinza volante utilizada para substituir parte do agregado miúdo. Alguns materiais inertes, como o filler por exemplo, tem a função de um agregado ultrafino e é importante para se obter boa trabalhabilidade para a execução de concreto bombeado ou concreto autoadensável;
- **Aditivos:** Os aditivos podem alterar majoritariamente a consistência, coesão, segregação e exsudação de concretos frescos. Como exemplo tem-se os aditivos plastificantes, superplastificantes e incorporadores de ar.

3.1.2 Propriedade no estado endurecido

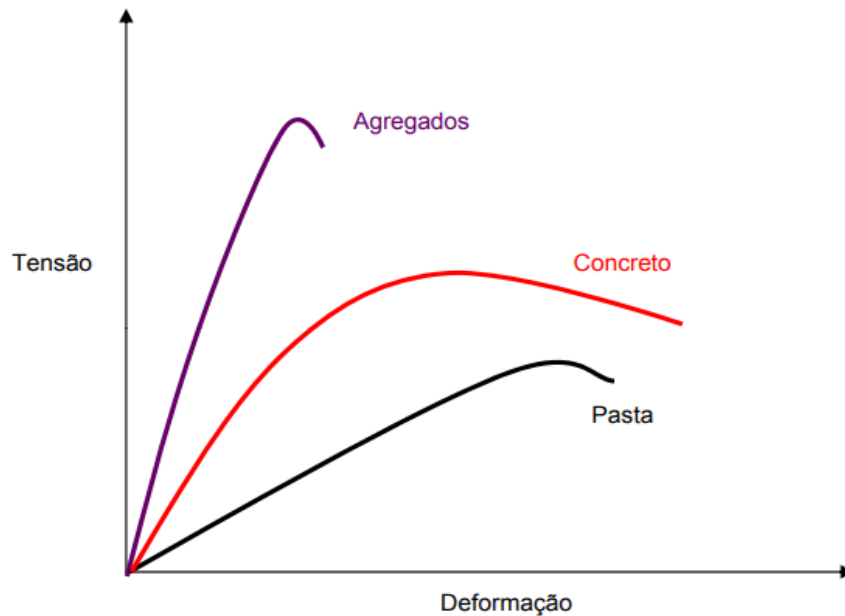
A resistência mecânica é o principal parâmetro para se avaliar a qualidade do concreto no estado endurecido, entretanto, para algumas situações específicas, outras características como a sua durabilidade à ação de agentes agressivos, o módulo de elasticidade, a ductilidade e a tenacidade, também são parâmetros de qualidade do material (ISAIA, 1998). De acordo com Andrade *et al.* (2013), o concreto pode ser solicitado à compressão, à tração e ao cisalhamento, com isso faz-se necessário o pleno estudo e conhecimento da resistência do concreto em seu estado endurecido para a utilização em pavimentos rígidos.

De acordo com Higgins (1982), a resistência é uma medida das forças externas aplicadas ao material, as quais são necessárias para vencer as forças internas de atração entre as partículas elementares do mesmo. Para o concreto, define-se a resistência mecânica como sendo a capacidade do material de suportar as cargas aplicadas sobre ele, sem que haja desmoronamento; considera-se resistência do concreto como a carga máxima aplicada sobre o corpo de prova (ANDRADE *et al.*, 2013).

O comportamento da tensão-deformação dos agregados e da pasta de cimento são diferentes se comparado com o desempenho do concreto, conforme ilustrado na Figura 6. A zona de transição no concreto possibilita uma região de aderência entre o cimento e os agregados que, conseqüentemente, possibilita uma

maior relação água/cimento e a formação do concreto com menor resistência comparado com os agregados (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Figura 6 - Comportamento tensão-deformação do concreto e dos seus materiais constituintes.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

De acordo com Andrade *et al.* (2013), Isaia (1968) e Neville e Brooks (2013), alguns fatores podem alterar a propriedade da estrutura de concreto no estado endurecido, pode-se destacar entre eles:

- **Relação água/cimento:** Assim como nas propriedades do concreto no estado fresco, o fator água/cimento é muito importante para o estado final da estrutura rija porque está estritamente ligado a durabilidade, impermeabilidade e porosidade;
- **Idade:** A dependência entre os fatores água/cimento e a resistência do concreto varia para cada tipo de cimento e para cada idade, bem como as condições de cura. Historicamente, utiliza-se como referência para aferir a resistência do concreto a idade de 28 dias;
- **Agregados:** Em concretos com níveis baixos de resistência a ruptura acontece na interface agregado/pasta, por outro lado em concretos de resistências maiores, as rupturas podem ocorrer nos agregados;
- **Tipos de cimento:** As propriedades físicas (finura e superfície específica) e as propriedades químicas (teores de aluminatos e silicatos de cálcio), são

diferentes na composição de cada tipo de cimento, por esse motivo a escolha do cimento adotado influenciará na resistência final;

- **Adições minerais e aditivos químicos:** O uso de adições minerais com grãos ultrafinos, como por exemplo o filler, podem ajudar a diminuir a porosidade do concreto no estado endurecido e, conseqüentemente, o processo de carbonatação ao longo dos anos será mais lento. Assim como a utilização de alguns aditivos podem acelerar e retardar a velocidade da resistência final do concreto.
- **Condições de cura:** Um dos principais fatores para a aferição da resistência do concreto no estado endurecido são as condições de cura do material. A contínua hidratação das partículas de agregados e, principalmente, de cimento, é de extrema relevância para que o concreto obtenha a resistência inicial desejada.

De acordo com Helene e Terzian (1992), os principais fatores que influenciam nos resultados dos ensaios de compressão estão expressos no Quadro 6 abaixo.

Quadro 6 - Fatores que influenciam na determinação da resistência à compressão do concreto.

	Causas de variação	Efeito máximo no resultado
Materiais	Variabilidade da resistência do cimento	$\pm 12\%$
	Variabilidade da quantidade total de água	$\pm 15\%$
	Variabilidade dos agregados (principalmente miúdos)	$\pm 8\%$
Mão-de-obra e Equipamentos	Variabilidade do tempo e procedimento de mistura	- 30%
	Ausência de aferição de balanças	- 15%
	Mistura inicial, sobre e subcarregamento, condições de correias	- 10%
Procedimento de ensaio	Coleta imprecisa	- 10%
	Adensamento inadequado	- 50%
	Cura inadequada (efeito considerando a idade > 28 dias)	$\pm 10\%$
	Acabamento inadequado da superfície dos corpos de prova	- 30% para concavidade - 50% para convexidade

Fonte: Helene e Terzian (1992).

4 CONCRETO *FAST TRACK*

O concreto *Fast Track* é uma tecnologia recente e inovadora. De acordo com a Federal Highway Administration (1994), o pavimento rígido fabricado com concreto *Fast Track* surgiu na cidade de Buena Vista Country, em 1896 nos Estados Unidos. A priori, o principal motivo da criação desse tipo de concreto era o pouco tempo de interrupção das rodovias e, conseqüentemente, a rápida liberação do tráfego de veículos.

De acordo com Isaia (1968), o parâmetro de tempo utilizado para que seja possível realizar a liberação das construções de concreto é de 28 dias, isto porque a resistência será de aproximadamente 99% da resistência final. Esse tempo total de espera, para que o concreto adquira a resistência necessária, pode ser facilmente aceitável em construções que têm um prazo maior para a finalização do projeto, como por exemplo na construção de novos pavimentos. Para Bull e Woodford (1997), esse tempo pode tornar-se impraticável quando é necessário que se tenha uma rápida liberação da via, como por exemplo em aeroportos, rodovias com intenso tráfego e áreas urbanas. Nesse sentido o pavimento de concreto *Fast Track* pode ser aplicado porque a cura da estrutura rígida é de apenas algumas horas.

De acordo com Silva *et al.* (2006), para a fabricação do concreto *Fast Track* qualquer tipo de cimento pode ser utilizado. Porém a resistência à compressão deve ser maior ou igual a 9 MPa em 12 horas.

Segundo Azevedo (2008), uma análise completa de dosagem em laboratório é essencial para a especificação de um traço de concreto *Fast Track*. Isso para que seja possível a obtenção de concretos de alta resistência utilizando materiais da própria região, como cimento, agregados, aditivos e adições.

Ainda de acordo com Azevedo (2008, p. 26), o estudo laboratorial da dosagem do concreto *Fast Track* é importante porque:

Através dos estudos da distribuição granulométrica dos agregados, da influência adicional do calor de hidratação, do teor de ar incorporado, da temperatura da água de amassamento, do processo de cura, da ambiência e da temperatura da sub-base, estes fatores podem influenciar a evolução da resistência do concreto a curto e longo prazo.

Além das análises laboratoriais anteriores, o processo construtivo dos pavimentos, a distribuição das barras de aço ao longo das estruturas, a selagem das juntas (FHWA, 1994), devem ser considerados no controle tecnológico do concreto *Fast Track*. A temperatura inicial da mistura também interfere nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, e na resistência final (ANSARI *et al.*, 1997). De acordo com FHWA (1994), selantes de juntas para a aplicação no concreto já estão disponíveis no mercado da construção civil.

O Quadro 7 apresentado por Rheinheimer (2007) contém o detalhamento de alguns pavimentos de concreto *Fast Track* executados nos Estados Unidos. Estas obras foram realizadas em aeroportos, rodovias, interseções, ruas, estradas com pequeno volume de tráfego e projetos industriais.

Quadro 7 - Exemplos de Traços de Pavimentos de Concreto.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	
Espessura (cm)		24,4	26,7	26,7	10,2	30,48	-			18	
Cimento	Tipo	Tipo I ¹	Tipo III	Tipo III	Tipo III	Tipo I	Tipo I	Tipo I	Tipo III	CPV ²	
	Consumo (kg/m ³)	341,41	290,56	338,23	323,25	324,61	362,75	320,07	340,5	455	
água/cimento		0,42	0,415	0,376	0,42	0,35	0,41	0,41	0,49	0,44	
Critério para abertura do tráfego	Flexão	-	2,76MPa 12hs	2,76MPa 12hs	-	3,1MPa 24hs	-		12 a 24hs	4,4MPa 28 dias	
	Compressão	17,25MPa 12hs	-		20,7MPa 12hs	-					
Resistência nos ensaios (MPa)	Flexão	24hs	-		5,175	-					
		28 dias	-							5,54	
	Compressão	outros	-	2,97MPa 12hs	4,07MPa 12hs	-	-	3,97MPa 6,5hs	400MPa 7hs	-	
		24hs	28,77	-		20,87	-	25,32	24,39		
		28 dias	38,85	-		-	-	40,57	36,54	-	39,26
		outros	15MPa 6hs	-		8,28MPa 12hs	4MPa 48hs	19,09MPa 6hs	16,31MPa 6hs	7,94MPa 7,8hs	-

¹ Os cimentos Tipo I e III corresponde aos da ASTM.
² O cimento CPV corresponde ao cimento Tipo III ASTM.

Fonte: Adaptado de Rheinheimer (2007).

Sendo que:

- **A:** pavimento de concreto *Fast Track* executado em Denver, CO, Estados Unidos. Fonte: ACPA (1994);
- **B:** pavimento de concreto *Fast Track* executado em Cedar Rapids, IA, Estados Unidos. Fonte: ACPA (1994);
- **C:** pavimento de concreto *Fast Track* executado em Cedar Rapids, IA, Estados Unidos. Fonte: ACPA (1994);
- **D:** pavimento de concreto *Fast Track* executado em Kansas City, KS, Estados Unidos. Fonte: ACPA (1994);
- **E:** pavimento de concreto *Fast Track* executado pela North Carolina DOT, Estados Unidos. Fonte: ACPA (1994);
- **F:** pavimento de concreto *Fast Track* executado em New Jersey, Estados Unidos. Fonte: Ansari et al. (1997);
- **G:** pavimento de concreto *Fast Track* executado em New Jersey, Estados Unidos. Fonte: Ansari et al. (1997);
- **H:** pavimento de concreto *Fast Track* executado pela Iowa DOT, Estados Unidos. Fonte: Whiting et al. (1997);
- **I:** pavimento executado no túnel Antonieta de Barros, Florianópolis. Fonte: Giublin et al. (2003).

A produção e a execução de pavimentos *Fast Track* devem seguir critérios rígidos de controle de qualidade para que o concreto adquira a resistência característica do projeto. Para isso é necessário que se tenha uma grande modificação no traço do concreto tradicional (RHEINHEIMER, 2007). Para Whiting et al. (1994), a proporção dos materiais, o alto consumo de cimento na ordem de 400 a 500 kg/m³, a baixa relação água/cimento e a utilização de adições e aditivos, fazem com que sejam possíveis a fabricação de concretos com alta resistência inicial.

O concreto *Fast Track* apresenta um custo inicial maior em comparação aos concretos convencionais para pavimentos, isto devido à utilização de maiores quantidades de cimento. Os custos totais da utilização do concreto em uma obra de pavimentação para pavimentos rígidos, representam de 5 a 8% a mais comparado com a utilização de pavimentos flexíveis (ANEVI, 2001). Além disso, de acordo com Azevedo (2008), é necessário que ensaios de resistência do concreto em idades iniciais sejam realizados nas obras através de equipamentos específicos, com isso o

custo final para a utilização do concreto *Fast Track* será maior na fase inicial do projeto.

4.1 MATERIAIS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO *FAST TRACK*

4.1.1 Cimento

O cimento Portland Tipos I, II ou III pode produzir misturas *Fast Track* com sucesso (JONES, 1988). O cimento mais utilizado nos concretos apresentados no Quadro 7, é o cimento do tipo III americano que corresponde ao cimento CPV-ARI. Segundo FHWA (1994), para a fabricação do concreto *Fast Track* estes cimentos terão maior desempenho para o ganho de resistência em poucas horas.

Os cimentos desempenham um papel importante na resistência e no desenvolvimento de calor, e essas propriedades dependem da interação dos compostos individuais que constituem o cimento (JONES, 1988). Para Whiting *et al.* (1994), uma alternativa viável para a fabricação de concreto *Fast Track* é a utilização de cimentos de aluminato de cálcio, porque de acordo com Metha e Monteiro (1994) os cimentos especiais de aluminato de cálcio apresentam uma hidratação química eficiente para a formação dos Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H), estes influenciam majoritariamente nas propriedades da resistência final do concreto. Em um cimento com tempo de pega adequadamente controlado, a estrutura da pasta de cimento hidratada é estabelecida pelo silicato de cálcio hidratado, enquanto, caso o aluminato tricálcio (C₃A) reagisse antes, seria formado um silicato de cálcio hidratado mais poroso (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Para Metha e Monteiro (1994), altos níveis de silicato tricálcico (C₃S) e partículas de cimento finamente moídas geralmente geram resistência rapidamente. O aluminato tricálcico (C₃A) também pode ser um catalisador para aumentar a taxa de hidratação do C₃S, liberando calor no início durante a hidratação do cimento (NEVILLE E BROOKS, 2013). No entanto, para Jones (1988), o C₃A não contribui muito para a resistência a longo prazo e, em geral, o C₃S é o principal contribuinte químico para as forças iniciais e de longo prazo.

Conforme a ACPA (1994), os concretos que usam cimento portland Tipo I e Tipo II também podem produzir características adequadas para construção *Fast Track*, desde que estes produzam as resistências mínimas exigidas no início e no

longo prazo. Para as construções no Brasil o cimento mais indicado é do tipo CPV-ARI porque este permite alta resistência em poucas horas (RHEINHEIMER, 2007). O cimento do tipo CPI também é uma alternativa, entretanto tem-se uma maior dificuldade para adquirir nas lojas de materiais para construção, devido ao fato desse tipo de material ser utilizado em apenas casos restritos onde deseja-se maior versatilidade (BATTAGIN, 2009).

4.1.2 Agregados

Conforme os requisitos da ACPA (1994), os agregados utilizados no concreto devem ter uma granulometria contínua e a relação agregado graúdo/miúdo deve estar no intervalo de 1:1 a 1,5:1. De acordo com Neville e Brooks (2013), a granulometria contínua resultará em um melhor desempenho na resistência do concreto, isto porque agregados de tamanho intermediário preencherão os vazios normalmente ocupados por pasta de cimento menos densa e, conseqüentemente, aumentará otimização da densidade do concreto (ASTM C 33, 2012).

Ainda de acordo com ASTM C 33 (2012), o aumento da densidade do concreto resultará em:

- Redução da demanda de água da mistura e, conseqüentemente, maior resistência porque menos argamassa é necessária para preencher o espaço entre os agregados;
- Maior durabilidade do concreto por meio de vias reduzidas de penetração de água na mistura endurecida;
- Melhor trabalhabilidade e mobilidade porque grandes partículas de agregado não se ligam em contato com outras partículas grandes sob a dinâmica de acabamento e vibração;
- Menos queda de borda devido ao maior contato de partícula a partícula;
- Desgaste reduzido em misturadores de concreto, tambores e equipamentos.

A uniformidade da curva granulométrica e a textura dos agregados também influenciam a trabalhabilidade, consolidação e acabamento do concreto (ISAIA, 2005). Para isso, de acordo com ASTM C 33 (2012), os agregados naturais grosseiros ou triturados em forma de cubo e as areias naturais são ideais para a

aplicação de pavimentos de alto desempenho, isto porque permitirá uma boa mobilidade para que o concreto flua com maior facilidade entre a estrutura das barras de aço do pavimento. Já os agregados intermediários, grandes ou alongados podem causar problemas de mistura (KOSMATKA, S.; PARARESE, W., 1988).

4.1.3 Água

A qualidade da água é importante porque suas impurezas podem interferir na pega do cimento, afetar negativamente a resistência do concreto e prejudicar a hidratação do cimento (NEVILLE E BROOKS, 2013). Segundo Isaia (1968), a hidratação do cimento é exotérmica e, assim, a resistência inicial do concreto está relacionada com essa liberação de calor proporcionada por esta reação química. Uma maneira de aumentar a temperatura do concreto plástico é aquecer a água da mistura, porém isso é mais prático apenas para pequenos projetos que não requerem uma grande quantidade de concreto, como reconstrução de intersecções (ISAIA, 2005).

Vários fatores influenciam a temperatura da água necessária para produzir uma temperatura de mistura desejável. Os fatores críticos são, a saber: temperatura do ar ambiente, temperaturas do agregado, teor de umidade do agregado e o tipo de cimento (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

4.2 PROCESSO CONSTRUTIVO

De acordo com Rheinheimer (2007), para a execução de pavimentos rígidos de concreto *Fast Track* não são necessários equipamentos diferentes do usual em pavimentação. Entretanto é necessário um ótimo planejamento, logística e uma equipe qualificada para a execução e otimização do tempo de construção do pavimento (RHEINHEIMER, 2007).

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005), as etapas de construção do pavimento rígido são, a saber:

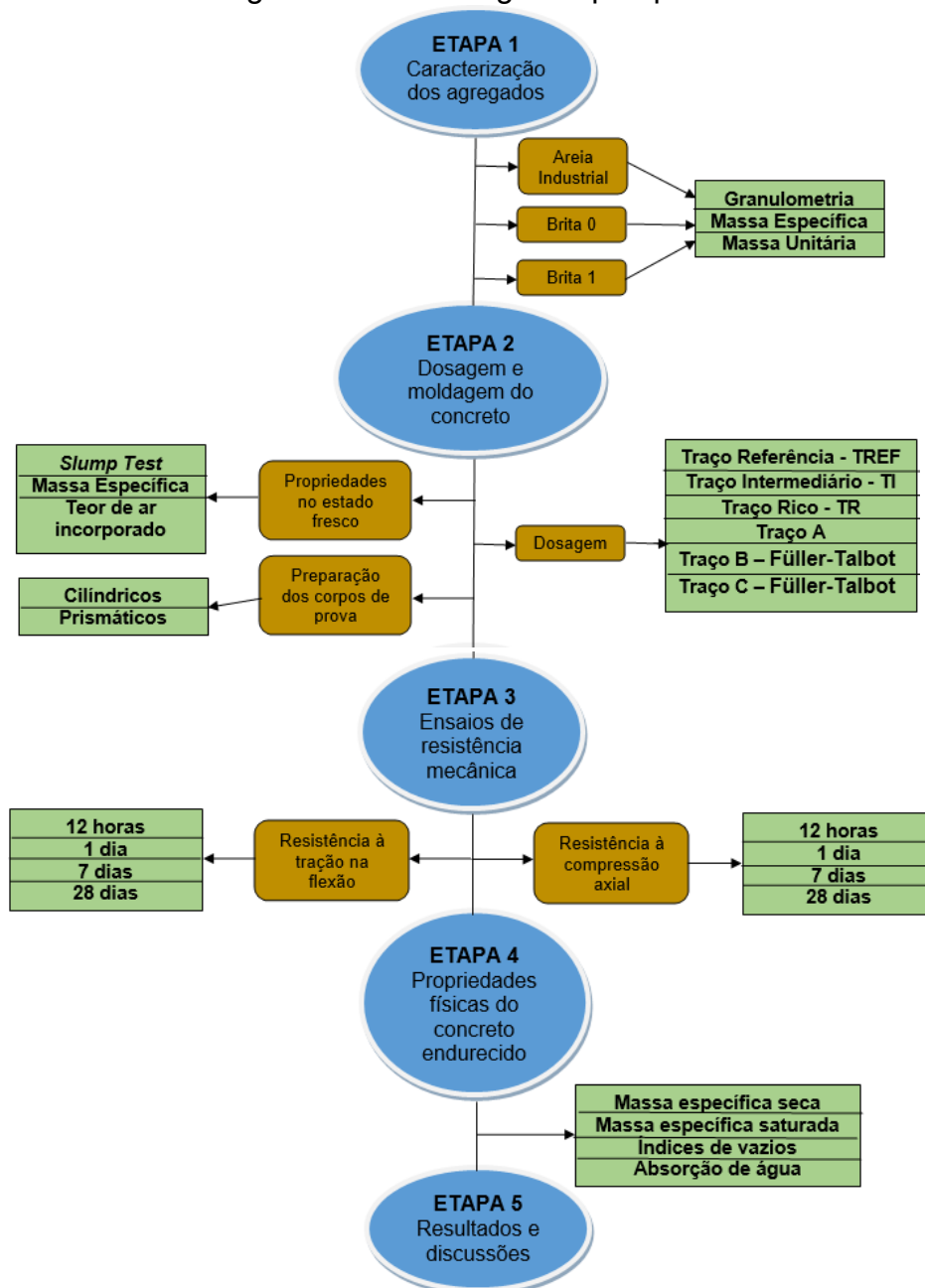
- Regularização do subleito, conforme os procedimentos da norma DNER-ES 299; e se necessário, reforço do modo indicado na norma DNER-ES 300;

- Execução da sub-base de acordo com as especificações estabelecidas pelo DNIT;
- Em seguida é realizada a mistura, o transporte, o lançamento e o espalhamento do concreto em toda a estrutura do pavimento;
- O adensamento do concreto deve ser feito por vibradores hidráulicos para garantir a uniformidade da mistura ao longo da via;
- O acabamento do concreto será feito por nivelamento topográfico e, conseqüentemente, a introdução de ranhuras na superfície do pavimento com o intuito de aumentar a aderência com os pneumáticos dos veículos;
- Deve ser realizada a identificação das placas de concreto com um número de identificação impresso em um de seus cantos;
- Por fim, a execução das juntas longitudinais e transversais devem estar em conformidade com as posições indicadas no projeto.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, de forma a possibilitar a análise das propriedades físicas do concreto *Fast Track* nos estados fresco e endurecido. A Figura 7 apresenta o método de pesquisa realizado para a execução desse trabalho.

Figura 7 - Metodologia da pesquisa.

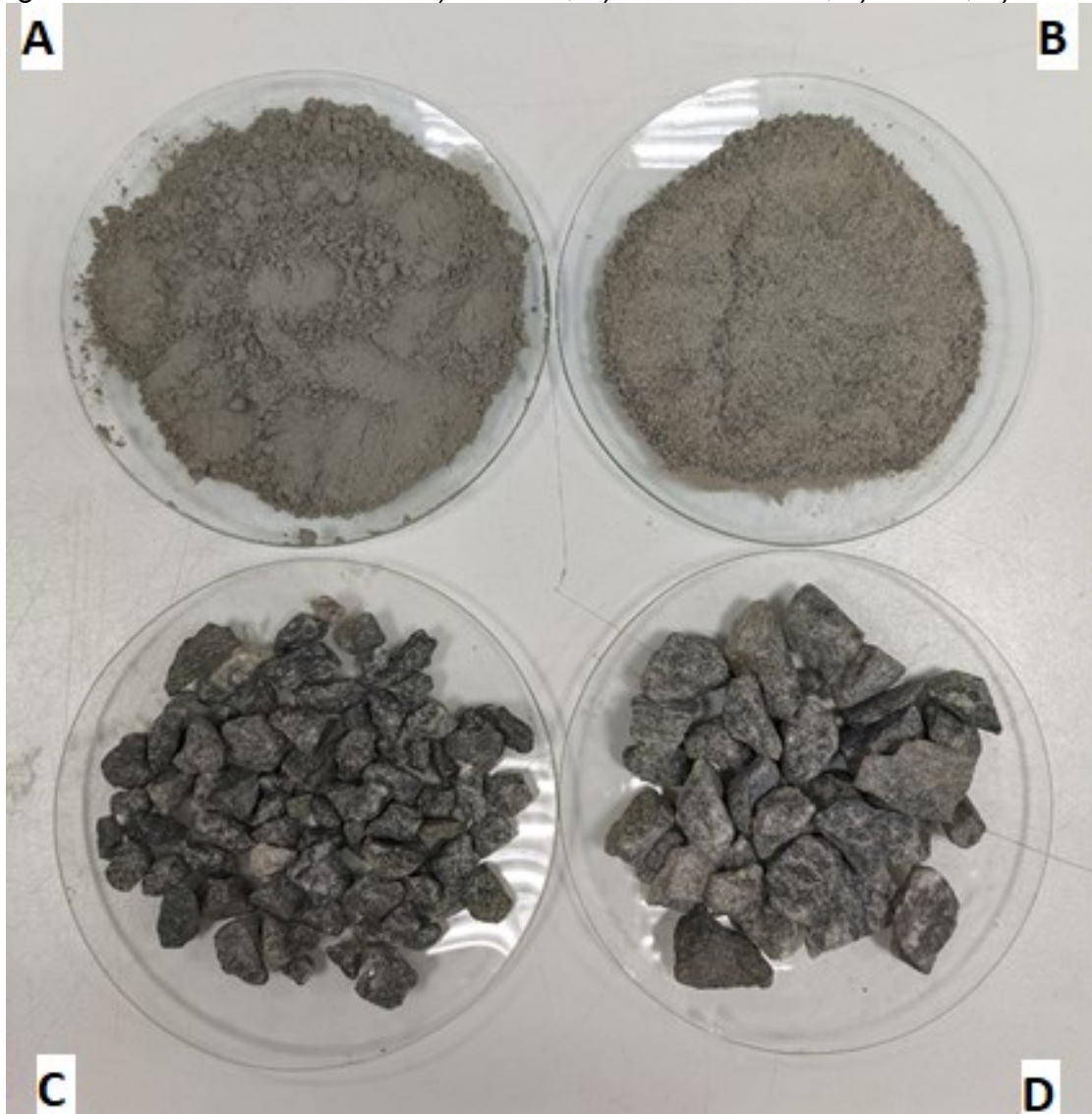


Fonte: O Autor (2021).

5.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a fabricação do concreto *Fast Track* serão, a saber: água, cimento, agregado miúdo (areia industrial) e agregado graúdo (britas do tipo 0 e 1).

Figura 8 - Materiais utilizados: a) cimento, b) areia industrial, c) brita 0, d) brita 1.



Fonte: O Autor (2021).

5.1.1 Água

A água utilizada será oriunda da rede pública de abastecimento da cidade de Joinville/SC.

5.1.2 Cimento

Para que seja possível a plena execução do concreto com alta resistência inicial, será utilizado o cimento Portland do tipo CPV-ARI da marca Itambé. Este cimento está de acordo com as características físicas especificadas na norma NBR 16697 (ABNT, 2018), conforme o Quadro 8.

Quadro 8 - Caracterização das propriedades físicas do cimento CPV-ARI.

Ensaio		Resultado
Resíduo #200		0,05%
Resíduo #325		0,36%
Expansibilidade à quente		0,23
Peso específico		3,09 g/cm ³
Superfície específica		4,419 cm ² /g
Resistência mecânica (MPa)	1 dia	24,3
	3 dias	39,3
	7 dias	45,5
	28 dias	54,4

Fonte: Boletim de ensaios da Itambé (2021).

De acordo com a ABCP (2002), este cimento tem característica de alta resistência inicial devido à sua composição, porque tem-se uma dosagem diferente de calcário e argila no processo de fabricação do clínquer. A moagem mais fina do cimento também é essencial para que, quando ocorrer a reação com a água, a estrutura de concreto tenha uma maior resistência com maior velocidade. O Quadro 9 apresenta a composição deste cimento.

Quadro 9 - Composição do cimento Portland do tipo CPV-ARI.

Tipo de cimento	Sigla	Composição (% em massa)		Norma brasileira
		Clínquer + gesso	Material carbonático	
Alta resistência inicial	CPV ARI	100 - 95	0 - 5	NBR 5733

Fonte: ABCP (2002).

5.1.3 Agregados

Como agregado graúdo utilizou-se uma brita granítica obtida na região de Joinville/SC. A caracterização dos agregados foi feita através do ensaio de granulometria e massa específica.

5.1.3.1 Distribuição granulométrica

Utilizando a NBR NM 248 (ABNT, 2003), é possível realizar o ensaio de granulometria para os agregados miúdo e graúdo. O módulo de finura e a dimensão máxima característica do agregado também podem ser obtidos a partir dos mesmos resultados.

Para a realização deste ensaio, é necessário que os agregados graúdo e miúdo sejam secos em uma estufa com temperatura de 105°C em um período total de 24 horas ininterruptas. Realizou-se dois ensaios para cada material, assim a distribuição granulométrica pôde ser obtida através da média aritmética dos mesmos. Para o agregado graúdo, cada ensaio foi realizado com 10 quilos do material, e para o agregado miúdo o peso total foi de 1 quilo.

Conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), as peneiras utilizadas para a distribuição granulométrica do agregado graúdo foram dispostas na seguinte ordem, a saber: 25 mm; 19 mm; 9,5 mm; 6,3 mm; 4,75 mm e 2,36 mm. Enquanto que para o agregado miúdo as peneiras utilizadas foram: 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm e 0,15 mm, sendo que para ambos os casos o conjunto contém a tampa e o fundo. Logo após colocar o material no conjunto, o tempo total no agitador mecânico foi de 5 minutos para cada amostra. Para o agregado graúdo a amostra total de 10 quilos foi separada em 5 partes de 2 quilos, para que o material pudesse ser completamente peneirado. Por fim, cada peneira foi pesada individualmente e plotou-se a curva da distribuição granulométrica.

Figura 9 - Peneiras utilizadas para o ensaio de granulometria.



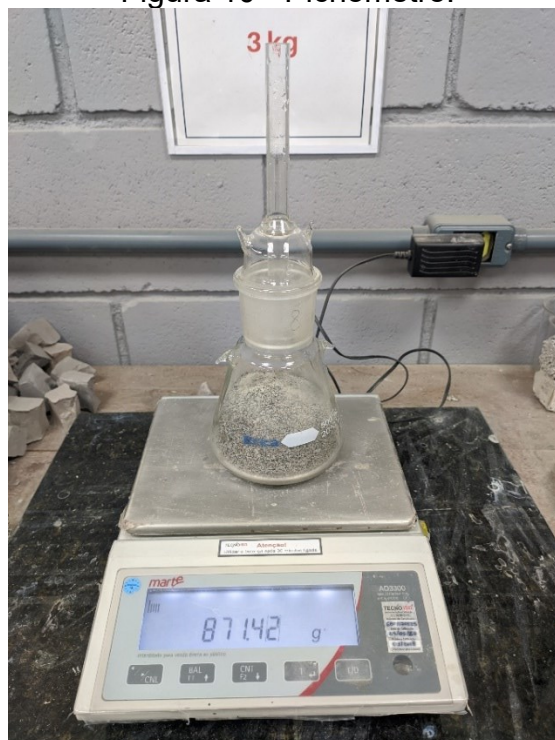
Fonte: O Autor (2021).

5.1.3.2 Massa específica do agregado miúdo

De acordo com as orientações dispostas na NBR 16916 (ABNT, 2009), foi possível realizar o ensaio para a determinação da massa específica do agregado miúdo. Neste ensaio é possível determinar a massa específica seca, massa específica saturada da superfície seca e a massa específica absoluta do agregado miúdo.

Para a realização do ensaio, pesou-se uma amostra de 500 gramas do agregado seco na estufa por um período de 24 horas e temperatura de 105°C. Colocou-se a amostra no picnômetro conforme Figura 10, e foi aferida a massa do picnômetro mais o agregado. Encheu-se o frasco com água potável até a marca de 500 mL, moveu-se o picnômetro de forma a eliminar as bolhas de ar e depois foi colocado em banho por um período de 1 hora. Logo após esse tempo, o nível de água foi novamente acertado para a marca de 500 mL e aferiu-se a massa do conjunto. Em seguida, colocou-se o agregado mais a água contida no picnômetro na bandeja e esta foi levada para a estufa por um período de 24 horas e, logo após este processo, pesou-se o material seco. O cálculo da massa específica aparente seca foi determinada através da Equação 1.

Figura 10 - Picnômetro.



Fonte: O Autor (2021).

O procedimento para o cálculo da massa específica saturada superfície seca segue o mesmo método descrito anteriormente, porém, o agregado estava inicialmente úmido. Este valor foi determinado pela Equação 2.

$$\rho_s = \frac{m}{V - \frac{md - mc}{\rho_a}} \quad (1)$$

Sendo que:

ρ_s = massa específica aparente do agregado seco (g/cm³);

m = massa da amostra seca em estufa (g);

mc = massa do picnômetro, mais a massa do agregado (g);

md = massa do picnômetro, mais a massa do agregado, mais a massa da água (g);

V = volume do picnômetro (cm³);

ρ_a = densidade da água (g/cm³).

$$\rho_{sss} = \frac{m_s}{V - \frac{md - mc}{\rho_a}} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{sss} = massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm³);

m_s = massa da amostra seca em estufa (g);

mc = massa do picnômetro, mais a massa do agregado (g);

md = massa do picnômetro, mais a massa do agregado, mais a massa da água (g);

V = volume do picnômetro (cm³);

ρ_a = densidade da água (g/cm³).

Com estes valores obtidos pelas equações anteriores, foi possível determinar a massa específica do agregado miúdo através da Equação 3.

$$\rho_s = \frac{m}{\left(V - \frac{md - mc}{\rho_a}\right) - \left(\frac{ms - m}{\rho_a}\right)} \quad (3)$$

Em que:

ρ_s = massa específica do agregado (g/cm³);

m = massa da amostra seca em estufa (g);

m_s = massa da amostra seca em estufa (g);

m_c = massa do picnômetro, mais a massa do agregado (g);

m_d = massa do picnômetro, mais a massa do agregado, mais a massa da água (g);

V = volume do picnômetro (cm³);

ρ_a = densidade da água (g/cm³).

A absorção de água do agregado pode ser calculada pela Equação 4.

$$Abs = \frac{mb - ma}{ma} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

Abs = absorção da água (%);

ma = massa da amostra seca em estufa (g);

mb = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g).

5.1.3.3 Massa específica do agregado graúdo

A massa específica do agregado graúdo é realizada através do método descrito pela norma NBR 16917 (ABNT, 2021).

Inicialmente separou-se uma quantidade total de 2 quilos de brita, tanto para as britas do tipo 0 e 1. Lavou-se a amostra sobre a peneira de malha 4,75 mm em água corrente, com o intuito de remover o pó e qualquer tipo de material da superfície do agregado. Logo após a lavagem, submergiu-se a brita com água potável em uma bandeja por um período de 24 horas. Após esse período, o agregado foi enxuto com um pano absorvente até que toda a água visível fosse eliminada, em seguida pesou-se o material nessa condição a fim de obter o valor da massa da amostra na condição saturada superfície seca.

Este material foi colocado na água em uma cesta de arame acoplada no inferior da balança de precisão, com isso foi possível aferir o valor da massa da amostra submersa em água. Logo após este procedimento, o material utilizado foi colocado em uma bandeja e levado para a estufa na temperatura de 105°C por um período de 24 horas. Por fim, determinou-se a massa seca do agregado.

Através disso foi possível determinar a massa específica do agregado seco (Eq. 5), a massa específica na condição saturada superfície seca (Eq. 6), a massa específica aparente (Eq. 7) e a absorção de água pelo agregado graúdo (Eq. 8).

$$\rho_s = \frac{ma}{mb-mc} \quad (5)$$

$$\rho_{SSS} = \frac{mb}{mb-mc} \quad (6)$$

$$\rho_a = \frac{ma}{ma-mc} \quad (7)$$

$$Abs = \frac{mb-ma}{ma} \times 100 \quad (8)$$

Em que:

ρ_s = massa específica do agregado seco (g/cm³);

ρ_{SSS} = massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm³);

ρ_a = massa específica aparente (g/cm³);

Abs = absorção de água (%);

ma = massa seca da amostra (g);

mb = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

mc = massa da amostra submersa em água (g).

5.1.3.4 Massa unitária

A massa unitária é obtida através da relação entre a massa e o volume ocupado pelo material, e considera-se os vazios existentes entre os grãos. Realizou-se o ensaio para os agregados graúdo e miúdo. Preencheu-se um recipiente cilíndrico de volume conhecido com o material sem que houvesse nenhum tipo de compactação do mesmo, em seguida foi pesado o conjunto. Com isso, a massa unitária pode ser definida conforme a Equação 9.

$$Mu = \frac{m_2-m_1}{V} \quad (9)$$

Sendo que:

Mu = massa unitária (kg/m³);

m1 = massa do recipiente (kg);

m_2 = massa do recipiente com o material (kg);

V = volume do cilindro (m^3).

5.2 DOSAGEM DO CONCRETO

Inicialmente, utilizou-se o traço de referência empregado na construção do pavimento rígido da BR 290 (*Free-Way*) executado pela concessionária Concepa, com adaptações propostas por Rheinheimer (2007) em sua pesquisa. Logo após, dosou-se mais dois traços variando o teor de agregado total por grama de cimento (m), como orienta o método de dosagem IPT/EPUSC/IBRACON, inicialmente proposto por IPT (1940).

Os agregados graúdo e miúdo foram submetidos a secagem em estufa por um período de 24 horas e temperatura de $105^{\circ}C$. Com isso, pode-se descartar a umidade proveniente dos agregados.

O traço utilizado foi exatamente similar ao proposto por Rheinheimer (2007). Entretanto, devido às diferenças da distribuição granulométrica dos materiais utilizados, o teor de agregado miúdo por quilograma de cimento (a) e o teor de agregado graúdo (p), sofreram uma pequena diferença em seus respectivos valores finais. O Quadro 10 apresenta o traço utilizado por Rheinheimer (2007) e o Traço Referência (TREF) com as adaptações feitas em laboratório. Para este trabalho não foi utilizado nenhum tipo de aditivo.

Quadro 10 - Quantidade de material utilizado para cada traço.

Traço (kg/m^3)			
		Traço Rheinheimer (2007)	Traço REF
Cimento	Tipo	CP I-ARI RS	CP V-ARI
	Consumo	538	525,88
Areia	Tipo	Grossa	Industrial
		Fina	-
	Quantidade	640,2	883,48
Brita	Tipo	Brita 1	Brita 0
		-	Brita 1
	Quantidade	861,9	428,59
Aditivo	Tipo	Éster policarboxílico modificado	-
	Quantidade	5,38	-
a/c		0,30	0,52

Fonte: O Autor (2021).

Considerando a quantidade de cimento unitária de 1 kg, o traço unitário proposto por Rheinheimer (2007) é: 1 : 1,7 : 1,6 : 0,3 : 1% (cimento : areia : brita : água/cimento : aditivo), e o traço unitário para o Traço Referência (TREF) pode ser descrito a seguir: 1 : 1,68 : 1,63 : 0,52 (cimento : areia : brita : água/cimento).

Para a obtenção do teor de argamassa seca da mistura, utilizou-se a Equação 10 a seguir.

$$p = \alpha \cdot (1 + m) - 1 \rightarrow 1,68 = \alpha \cdot (1 + 3,31) - 1 = 0,62\% \quad (10)$$

Em que:

m = teor de agregado total por quilograma de cimento;

a = teor de agregado miúdo por quilograma de cimento;

p = teor de agregado graúdo por quilograma de cimento;

α = teor de argamassa seca da mistura (%).

A proporção da relação água/materiais (H) foi calculada de acordo com a Equação 11.

$$H = \frac{100 \cdot a/c}{1+m} = \frac{100 \cdot 0,52}{1+3,31} = 12,06 \quad (11)$$

Onde:

H = relação água/materiais secos;

(1 + m) = materiais secos;

a/c = relação água/cimento.

Logo após a realização do traço referência, realizou-se os ensaios de tração na flexão nas idades de 12 horas, 1 dia, 7 dias e 28 dias, conforme os procedimentos propostos pela NBR 12142 (ABNT, 2010).

Conforme o Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005), para a liberação do tráfego de veículos em pavimentos rígidos no Brasil, o valor da resistência no ensaio de tração na flexão é de 4,5 MPa. De acordo com Godinho e Grossi (2000), o Departamento de Transportes de Iowa (EUA) admite uma resistência mínima de 2,5 MPa em 12 horas para a abertura do tráfego. Assim, optou-se em utilizar este último

valor de resistência na flexão para este trabalho, visto que é uma boa margem de segurança para a aplicação do concreto *Fast Track*.

A seguir, para a construção da curva de dosagem, calculou-se os outros dois traços com um maior percentual de cimento. Para o Traço Intermediário (TI), utilizou-se o teor de agregado total por quilograma de cimento (m) igual a 2, e para o Traço Rico (TR), este valor é de 1,5.

Com isso, através da Equação 12 foi possível calcular a relação água/cimento para ambos os traços.

$$a/c = H(\%) \cdot (1 + m) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} a/c (TI) &= 12,06\% \cdot (1 + 2,0) = 0,36 \\ a/c (TR) &= 12,06\% \cdot (1 + 1,5) = 0,30 \end{aligned}$$

O valor do teor de agregado miúdo por quilograma de cimento (a) pode ser calculado pela Equação 13.

$$a = \alpha \cdot (1 + m) - 1 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} a (TI) &= 0,62 \cdot (1 + 2,0) - 1 = 0,86 \\ a (TR) &= 0,62 \cdot (1 + 1,5) - 1 = 0,55 \end{aligned}$$

Por fim, o valor do teor de agregado graúdo por quilograma de cimento (p) foi calculado pela Equação 14.

$$p = m - a \quad (14)$$

$$\begin{aligned} p (TI) &= 2,5 - 0,86 = 1,14 \\ p (TR) &= 2,5 - 0,55 = 0,95 \end{aligned}$$

O consumo de cimento pode ser calculado através da Equação 15.

$$C = \frac{\gamma_c}{(1+a+p+a/c)} \quad (15)$$

Em que:

γ_c = massa específica aparente do concreto no estado fresco (g/cm^3);

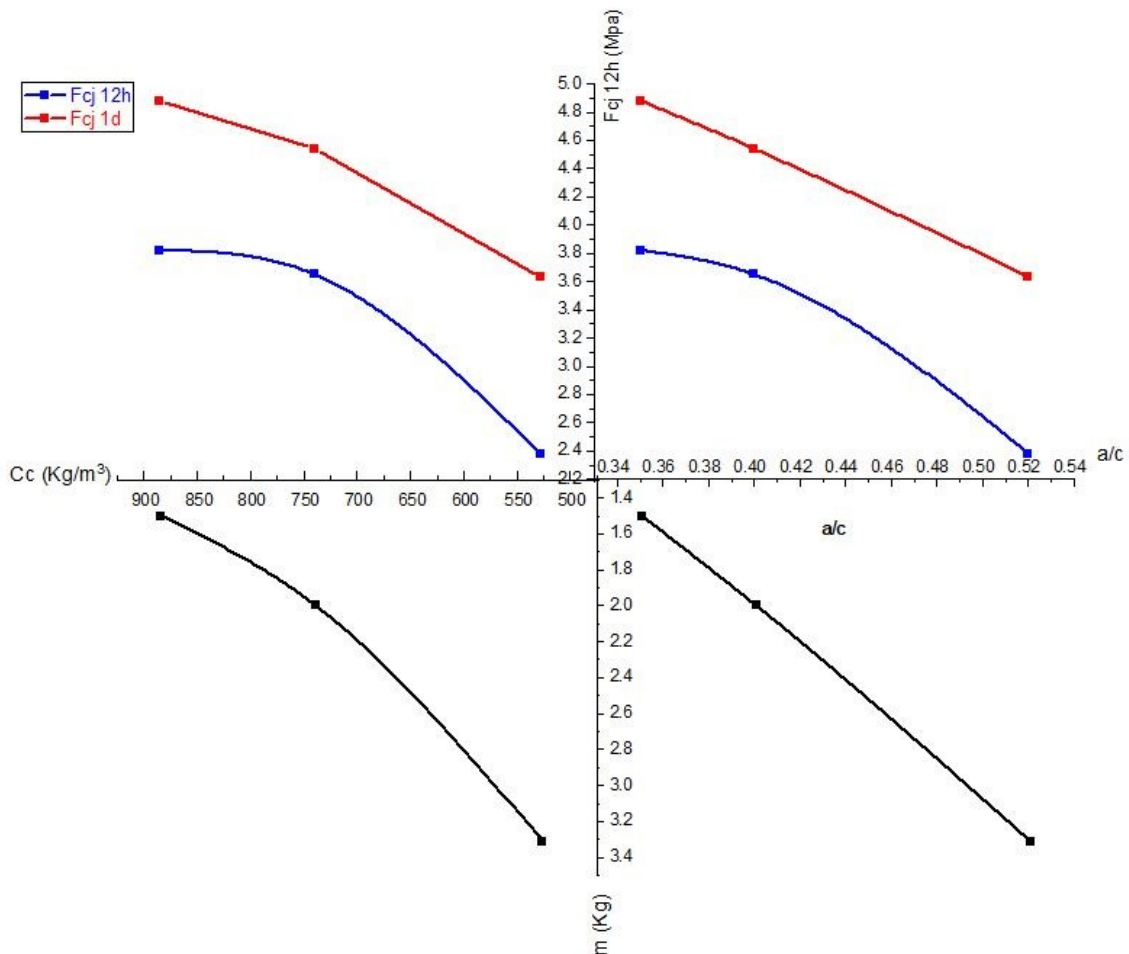
O Quadro 11 apresenta os traços unitários em massa utilizados realizados para a confecção da curva de dosagem do concreto *Fast Track* utilizando o Método IPT/EPUSC/IBRACON (IPT, 1940). Em seguida, através dos resultados obtidos na Quadro 11, foi possível plotar o gráfico da Figura 11 para correlacionar os parâmetros necessários para se obter o concreto *Fast Track* pelo Método IPT/EPUSC/IBRACON.

Quadro 11 - Traços unitários e consumos de cimento.

Traço (kg)					
Traço - TREF		Traço - TI		Traço - TR	
Cimento	1	Cimento	1	Cimento	1
Areia	1,68	Areia	0,86	Areia	0,55
Brita	1,63	Brita	1,14	Brita	0,95
Relação a/c	0,52	Relação a/c	0,40	Relação a/c	0,35
Consumo de cimento (g/cm ³)	525,88	Consumo de cimento (kg/m ³)	738,24	Consumo de cimento (kg/m ³)	884,21

Fonte: O Autor (2021).

Figura 11 - Gráfico para realizar a dosagem do concreto *Fast Track*.



Fonte: O Autor (2021).

De acordo com os critérios para o desenvolvimento do Método IPT/EPUSC/IBRACON (IPT, 1940), o parâmetro S_d representa o desvio-padrão de dosagem (MPa). Este é utilizado por causa da variabilidade do material e das circunstâncias de mistura e pesagem para a realização do concreto, conforme apresentado na Tabela 1. Para a realização do Traço A, o valor deste parâmetro foi de 0,4 MPa. Este valor foi utilizado porque a umidade e a quantidade, em massa, dos agregados foram controladas.

Tabela 1 – Condições e classes para o Método IPT/EPUSC/IBRACON.

S_d	CONDIÇÃO	CLASSE	TIPO DE CONCRETO
4,0	A	C10 a C80	Quando todos os materiais forem medidos em peso e houver medidor de água, corrigindo-se as quantidades de agregado miúdo e água em função de determinações freqüentes e precisas do teor de umidade dos agregados, e houver garantia de manutenção, no decorrer da obra, da homogeneidade dos materiais a serem empregados.
5,5	B	C10 a C25	Quando o cimento for medido em peso e os agregados em volume, e houver medidor de água, com correção do volume do agregado miúdo e da quantidade de água em função de determinações freqüentes e precisas do teor de umidade dos agregados.
7,0	C	C10 a C15	Quando o cimento for medido em peso e os agregados em volume, e houver medidor de água, corrigindo-se a quantidade de água em função da umidade dos agregados simplesmente estimada.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), para o cálculo da resistência do concreto à compressão utiliza-se a Equação 16.

$$F_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot S_d \quad (16)$$

Em que:

F_{cj} = resistência do concreto à compressão na idade j dias (MPa);

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto (MPa);

S_d = desvio-padrão de dosagem (MPa);

1,65 = quantidade correspondente a 5% na curva de densidade da distribuição de Gauss.

Considerando o valor mínimo da resistência de 2,5 MPa para a abertura do tráfego e o desvio-padrão de 0,4 MPa, o valor de entrada nos gráficos da dosagem foi de 3,16 MPa. Logo após as correlações realizadas no gráfico da Figura 11, o traço unitário para 1 kg de cimento do Traço A foi: 1 : 1,17 : 1,33 : 0,47 (cimento : areia : brita : água/cimento).

5.2.1 Método teórico - Füller-Talbot

Uma das metodologias utilizadas para determinar a granulometria dos agregados em pavimentos flexíveis ou rígidos é a metodologia teórica. De acordo com Barra (2005), o esse método tem como objetivo calcular curvas granulométricas bem definidas para o melhor desenvolvimento e aplicação do material utilizado em pavimentos rígidos e flexíveis.

O objetivo desse método é que as partículas menores preencham os vazios das partículas maiores com o intuito de se obter uma granulometria contínua, resultando, assim, a maior compactação do material utilizado e, por decorrência, a diminuição do número de vazios. Dois diâmetros são fixados neste método, o diâmetro máximo e mínimo, cujo objetivo é de atender adequadamente a quantidade de cada partícula que será utilizada na mistura do concreto. A Figura 12 apresenta uma parte do conjunto de peneiras utilizado para o peneiramento do material mais fino dos traços B e C.

Figura 12 - Peneiras utilizadas para o método de Füller-Talbot.



Fonte: O Autor (2021).

A porcentagem de cada fração granular deve estar de acordo com os cem por cento dos particulados passantes. Assim, para o cálculo desta porcentagem,

utiliza-se as equações de Füller-Talbot dispostas no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), utiliza-se a Equação 17.

$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (17)$$

Em que:

%p = percentagem em peso que passa na peneira de abertura d (menor diâmetro);

a = constante, tomada igual a 100;

d = abertura de uma dada peneira (mm);

D = tamanho máximo do agregado, abertura da peneira que passa 100% (mm);

n = expoente.

O termo exponencial “n” pode ser calculado através da Equação 18.

$$n = \frac{\log(\%p) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (18)$$

Sendo que:

n = expoente;

d = abertura de uma dada peneira;

D = tamanho máximo do agregado, abertura da peneira que passa 100% (mm);

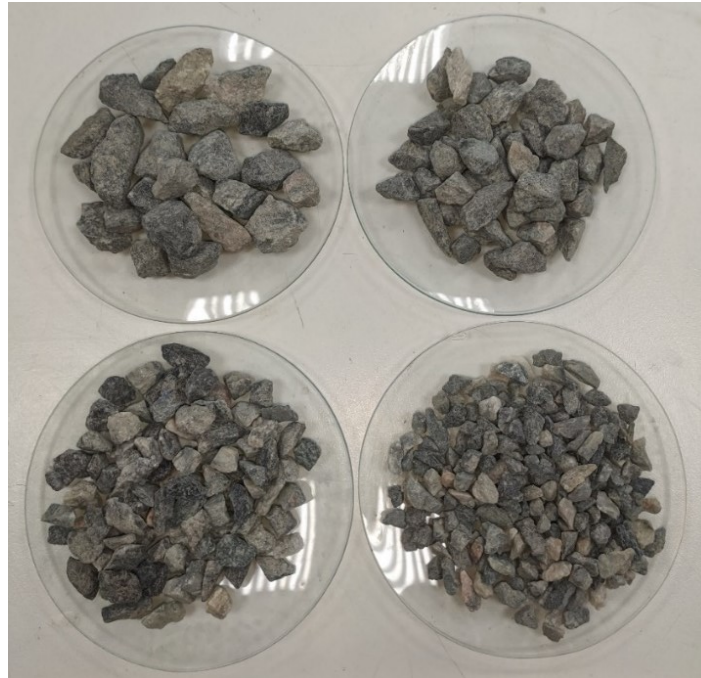
De acordo com DNIT (2006), o termo exponencial “n” representa se a curva granulométrica é aberta, densa ou do tipo macadame. Os intervalos desse valor exponencial são descritos a seguir (DNIT, 2006):

- Agregado de graduação densa: $0,35 < n < 0,55$;
- Agregado de graduação aberta: $0,55 < n < 0,75$;
- Agregado do tipo macadame: $D \geq 2d$; $n \geq 1,0$.

De acordo com Bernucci *et al.*, (2010), a graduação densa apresenta superioridade na estabilização mineral e continuidade da curva granulométrica, isto pode ser explicado pelo fato de maior atrito entre as partículas e menor número de

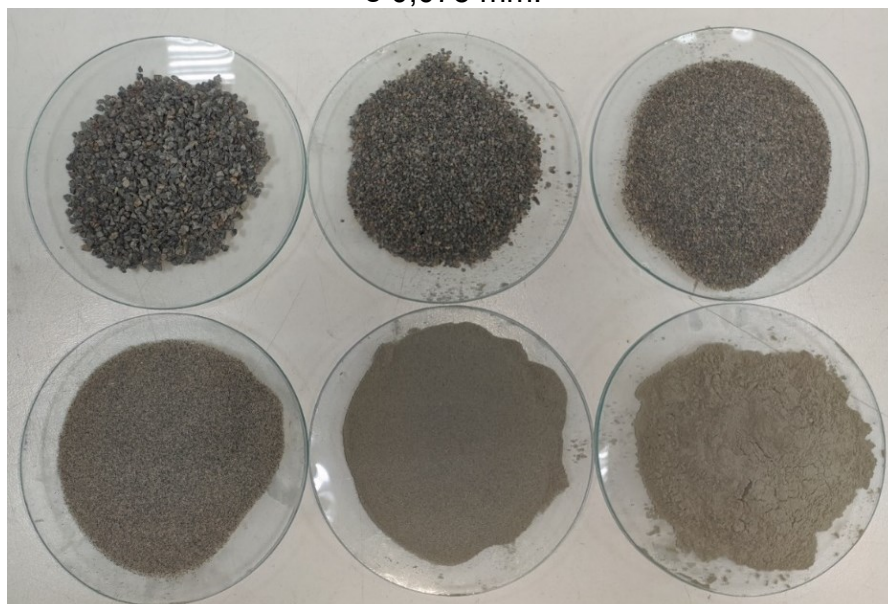
vazios. Para a graduação aberta, o elevado número de vazios ocasionado por partículas maiores, dificulta o contato entre os grãos e, conseqüentemente, proporciona uma curva menos contínua dos agregados (BERNUCCI *et al.*, 2010). A Figura 13 e a Figura 14 apresentam o material retido nas peneiras para a realização dos Traços B e C.

Figura 13 – Material retido nas peneiras: 12,7 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,8 mm.



Fonte: O Autor (2021).

Figura 14 - Material retido nas peneiras: 2,2 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.



Fonte: O Autor (2021).

5.2.2 Mistura do material

Realizou-se a mistura do material em uma betoneira de 120 litros de capacidade, conforme Figura 15. O material foi adicionado em três etapas, a saber: 80% da água e todo o material graúdo, britas 0 e 1; logo após adicionou-se o cimento; conseqüentemente, o agregado miúdo e o restante da água foram adicionados.

O tempo de mistura dos traços de concreto foi mantido o mesmo para todas as misturas, conforme descrito a seguir.

- a) brita + água → 1 minuto e 30 segundos;
- b) + cimento → 2 minutos e 30 segundos;
- c) areia + água → 3 minutos.

Figura 15 - Betoneira de 120 litros.



Fonte: O Autor (2021).

5.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

5.3.1 Ensaios no estado fresco

5.3.1.1 *Slump Test*

De acordo com a norma NBR 16889 (ABNT, 2020), o ensaio do abatimento do tronco de cone é um método para determinar a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento, em laboratório e obra. A Figura 16 apresenta os equipamentos utilizados neste ensaio.

Figura 16 - Equipamentos do *Slump Test*.



Fonte: O Autor (2021).

Para a realização do *Slump Test*, coloca-se o concreto no tronco de cone em três camadas de aproximadamente um terço de altura do molde compactado e, para cada camada, aplica-se 25 golpes com a haste de compactação. Rasa-se a superfície do cone em movimentos rolantes da haste de compactação, para que fosse possível realizar a medição de abatimento adequadamente. A altura do abatimento é expressa em milímetros, arredondando aos 5 mm mais próximos.

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), o abatimento do tronco de cone para o concreto utilizado em pavimentos rígidos é 70 mm, com variação de 10 mm superior ou inferior.

5.3.1.2 Determinação da massa específica aparente, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico

Conforme a norma NBR 9833 (ABNT, 2009), para a determinação da massa específica aparente, do rendimento e do teor de ar incorporado do concreto no estado fresco, é necessário utilizar um cilindro metálico de volume e massa conhecidos. Colocou-se o concreto no recipiente em duas camadas e realizou-se o adensamento vibrado, em que o intuito é de preencher o todo o recipiente de forma adequada. A superfície do cilindro foi rasada e a massa do conjunto foi aferida, conforme Figura 17.

Figura 17 - Cilindro metálico para a determinação da massa específica do concreto.



Fonte: O Autor (2021).

Para a determinação dos valores da massa específica aparente, do rendimento e do teor de ar incorporado, utiliza-se as seguintes equações contidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Equações utilizadas para o cálculo das propriedades físicas do concreto no estado fresco.

Propriedades físicas do concreto fresco	Equações	Comentários
Massa específica (kg/m ³)	$\rho_{ap} = \left(\frac{m}{V}\right) \cdot 1000$	ρ_{ap} = massa específica aparente do concreto (kg/m ³) m = massa do concreto (kg) V = volume do recipiente (dm ³)
Rendimento (m ³)	$R = \frac{mc + mt + mg + ma}{\rho_{ap}}$	R = rendimento (m ³) mc = massa de cimento da betonada (kg) mt = massa total de agregado miúdo da betonada (kg) mg = massa total de agregado graúdo da betonada (kg) ma = massa total da água adicionada na betonada (kg)
Consumo de cimento (kg/m ³)	$C = \frac{m_c}{R}$	C = consumo de cimento (kg/m ³)
Volume total dos componentes da betonada (m ³)	$V_t = \frac{mc}{\rho_c} + \frac{mt}{\rho_t} + \frac{mg}{\rho_g} + \frac{ma}{\rho_a}$	V _t = volume total dos componentes da betonada (m ³) ρ_c = massa específica do cimento (kg/m ³) ρ_t = massa específica do agregado miúdo (kg/m ³) ρ_g = massa específica do agregado graúdo (kg/m ³) ρ_a = massa específica da água (kg/m ³)
Índice de ar	$I_a = \frac{R}{V_t}$	I _a = índice de ar presente na mistura
Teor de ar (%)	$A = \left(1 - \frac{1}{I_a}\right) \times 100$	A = teor de ar do concreto (%)

Fonte: O Autor (2021).

5.3.1.3 Moldagem dos corpos de prova

Para o Traço de Referência (TREF) e para os dois traços da dosagem do concreto, foi moldado um total de 4 corpos de prova para cada traço, para que fosse possível realizar o rompimento no ensaio de tração na flexão. Logo após plotar as curvas de dosagem, para o Traço A moldou-se um total de 24 corpos de prova, sendo 12 para o ensaio de tração na flexão, 8 para o ensaio de compressão axial e 4 para os índices físicos do concreto endurecido.

A mesma quantidade de corpos de prova, 12, foi moldada para os traços B e C utilizando o método de Füller-Talbot. As idades de rompimento para estes traços foram de: 12 horas, 1 dia, 7 dias e 28 dias.

Os corpos de prova utilizados para o ensaio de compressão são cilíndricos com altura de 20 cm e 10 cm de diâmetro. Para o ensaio de tração na flexão, os corpos de prova são prismáticos com dimensões de 10 cm x 10 cm x 35 cm.

Utilizou-se vaselina industrial para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova. Estes foram desmoldados um pouco antes da primeira idade de rompimento, que são 12 horas. A Figura 18 apresenta a quantidade total de corpos de prova.

Figura 18 - Corpos de prova para os ensaios de compressão e flexão.



Fonte: O Autor (2021).

5.3.2 Ensaios no estado endurecido

5.3.2.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

A norma NBR 9778 (ABNT, 2009) contempla alguns ensaios para a obtenção das propriedades do concreto no estado endurecido. Para a execução destes ensaios é necessário que se realize a secagem da amostra para que a

determinação da massa seja feita na condição seca do material. Para isso a amostra deve ser submetida à uma temperatura de (105 ± 5) °C por um período de 72 horas.

Para determinar a massa na condição saturada e imersa de água, a amostra foi imergida em água à temperatura de (23 ± 2) °C em um tempo de 72 horas. Logo após a etapa de saturação em água, coloca-se a amostra em um recipiente cheio de água, que foi progressivamente levado à ebulição, em um intervalo superior a 15 minutos e inferior a 30 minutos. A ebulição foi mantida por um período de 5 horas e, conseqüentemente, a água foi resfriada naturalmente até a temperatura de (23 ± 2) °C.

As equações utilizadas para o cálculo das propriedades físicas estão contidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Equações utilizadas para o cálculo das propriedades físicas do concreto no estado endurecido.

Propriedades Físicas do concreto endurecido	Equações	Comentários
Absorção de água (%)	$A_a = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \right) \cdot 100$	A_a = absorção da água por imersão (%) m_{sat} = massa da amostra saturada (g) m_s = massa da amostra seca em estufa
Índice de vazios (%)	$I_v = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_f} \right) \cdot 100$	I_v = índice de vazios (%) m_f = massa da amostra saturada imersa em água (g)
Massa específica da amostra seca (g/cm^3)	$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_f}$	ρ_s = massa específica da amostra seca (g/cm^3)
Massa específica da amostra saturada (g/cm^3)	$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_f}$	ρ_{sat} = Massa específica da amostra saturada (g/cm^3)
Massa específica real (g/cm^3)	$\rho_R = \frac{m_s}{m_s - m_f}$	ρ_R = Massa específica real (g/cm^3)

Fonte: O Autor (2021).

5.3.2.2 Resistência à Compressão Axial

A norma NBR 5739 (ABNT, 2018) especifica o método de ensaio para a determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Utilizou-se uma prensa classe 2, cuja capacidade máxima é de 100 tf, conforme apresentado na Figura 19. O ensaio foi realizado em 4 idades de rompimento, são elas: 12 horas, 1 dia, 7 dias e 28 dias.

As tolerâncias máximas de tempo permitida para o rompimento dos corpos de prova estão expressas conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Tolerância para a idade do ensaio.

Idade de ensaio	Tolerância permitida (h)
24 h	0,5
3 d	2
7 d	6
28 d	24
63 d	36
91 d	48

NOTA: Para outras idades de ensaio, a tolerância deve ser obtida por interpolação.

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2018).

Figura 19 - Máquina de ensaios para a resistência à compressão simples.



Fonte: O Autor (2021).

Para o cálculo da resistência à compressão, a Equação (19) a ser utilizada está expressa abaixo.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (19)$$

No qual:

f_c = É a resistência à compressão (MPa);

F = Força máxima alcançada (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm).

Caso a relação h/d seja menor que 1,94; a força F deve ser multiplicada pelo fator de correção, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Fator de correção h/d .

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,96	0,96	0,93	0,86

NOTA: Valores intermediários podem ser obtidos por interpolação linear, com aproximação de centésimos.

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2018).

Para avaliar a eficiência das operações do ensaio realizado, as variações devem estar de acordo com a tabela do Anexo B da norma NBR 5739 (ABNT, 2018).

5.3.2.3 Resistência à Tração na Flexão

O método de ensaio de tração por flexão de corpos de prova de concreto, no qual emprega-se o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão, deve estar de acordo com a norma NBR 12142 (ABNT, 2010).

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a ABNT NBR 5738. Os ensaios foram realizados conforme a norma ABNT NBR 12142.

Figura 20 - Máquina de ensaios para a resistência à tração na flexão.



Fonte: O Autor (2021).

A força aplicada no corpo de prova deve estar compreendida no intervalo de 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min. Assim, a resistência à tração na flexão pode ser calculada conforme a Equação (20).

$$f_{ct,f} = F \cdot \frac{l}{b} \cdot d^2 \quad (20)$$

Entretanto, se a ruptura ocorrer fora do terço médio a uma distância superior a 5% da distância l , conforme expresso na Equação (20), a resistência à tração deve ser calculada pela Equação (21).

$$f_{ct,f} = 3 \cdot F \cdot \frac{a}{b} \cdot d^2 \quad (21)$$

Onde:

$f_{ct,f}$ = é a resistência à tração na flexão (MPa);

F = força máxima registrada na máquina de ensaio (N);

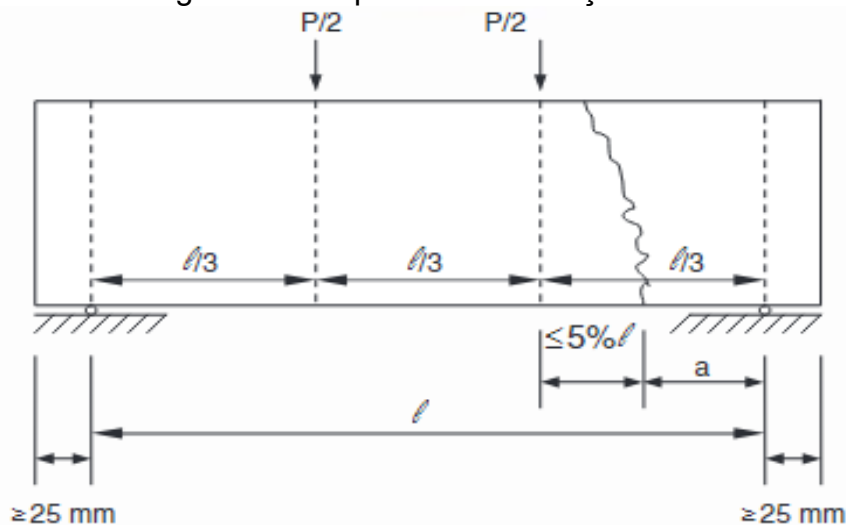
l = dimensão do vão entre apoios (mm);

b = largura média do corpo de prova (mm);

d = altura média do corpo de prova (mm);

a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).

Figura 21 - Ruptura fora do terço médio.



Fonte: NBR 12142 (ABNT, 2010).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados e das propriedades do concreto em seu estado fresco e endurecido. A seguir, foram abordadas as discussões dos resultados.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os agregados graúdo e miúdo foram obtidos através do processo de britagem de rocha granítica na região de Joinville/SC. Sendo assim, a natureza mineralógica desses materiais é a mesma.

6.1.1 Distribuição granulométrica dos agregados

Para os agregados graúdo e miúdo, realizaram-se a granulometria e a massa específica para as britas do tipo 0 e 1 e também para a areia industrial. Na Tabela 6, encontram-se os resultados do módulo de finura e dimensão máxima dos agregados graúdos. A partir desses valores, foi possível plotar as curvas da distribuição granulométrica desses materiais, conforme a Figura 22.

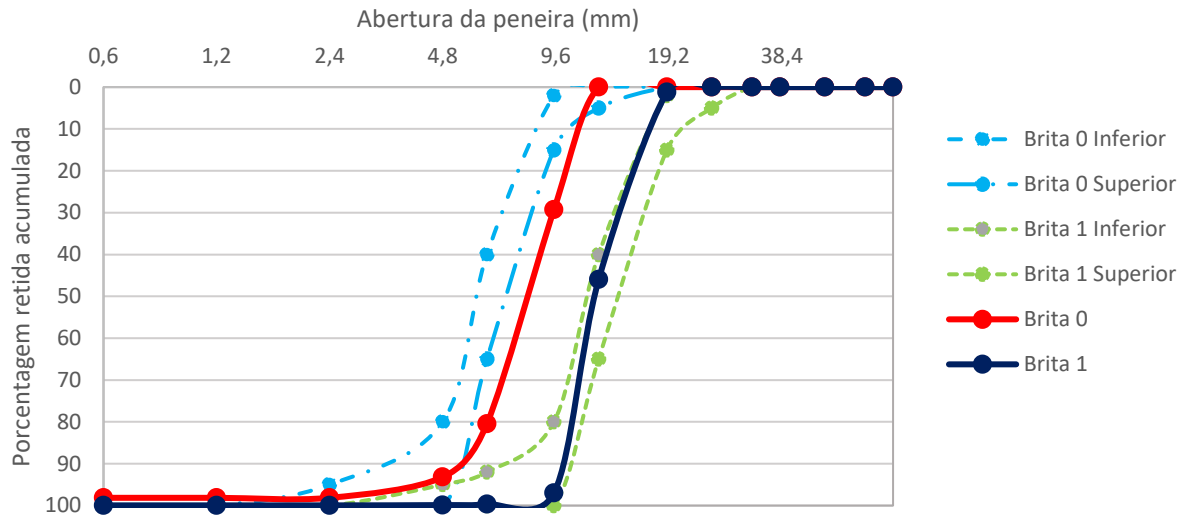
É possível observar que a brita do tipo 0 encontra-se fora dos limites de referência estabelecidos pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), em relação à abertura das peneiras de 4,8 mm e 9,5 mm. Isto indica uma grande quantidade retida do material nestas peneiras. Entretanto, este material pode ser classificado como brita do tipo 0 sem prejudicar no desenvolvimento e resistência final do concreto *Fast Track*. Por outro lado, a brita do tipo 1 está inteiramente dentro dos limites referência superior e inferior.

Tabela 6 - Resultados obtidos através do ensaio de granulometria para o agregado graúdo.

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)
Brita 0	6,13	9,5
Brita 1	6,98	19,00

Fonte: O Autor (2021).

Figura 22 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.



Fonte: O Autor (2021).

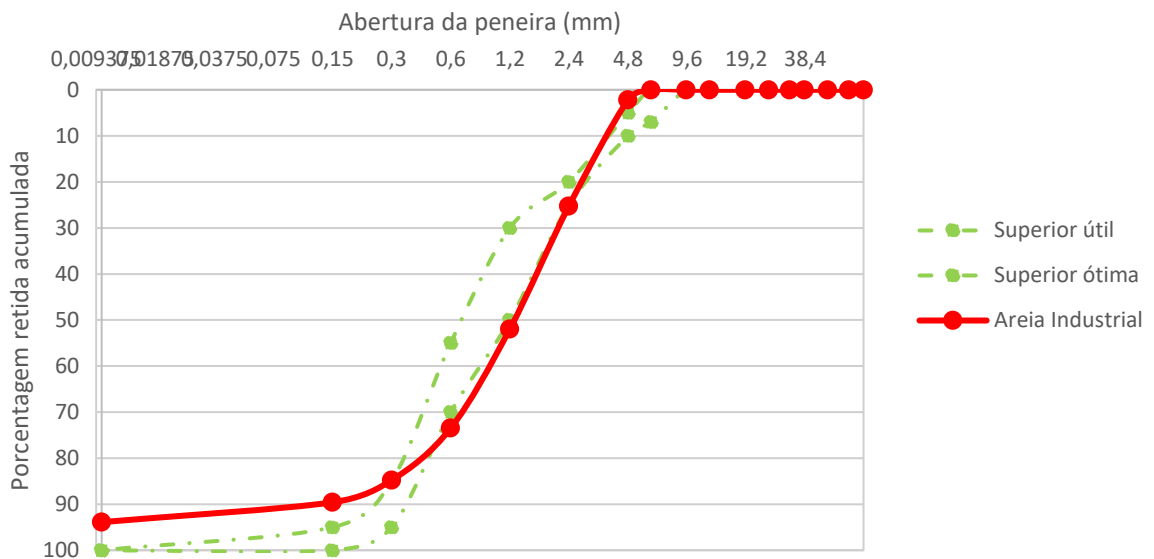
Realizaram-se os mesmos ensaios de granulometria e massa específica para o agregado miúdo. O módulo de finura e a dimensão máxima encontram-se na Tabela 7, e a distribuição granulométrica na Figura 23.

Tabela 7 - Valores obtidos através do ensaio de granulometria para o agregado miúdo.

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)
Areia Industrial	3,28	2,36

Fonte: O Autor (2021).

Figura 23 - Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: O Autor (2021).

Pela análise da Figura 23, é possível afirmar que a curva granulométrica está majoritariamente dentro dos limites referência superior e inferior, apenas com uma ligeira diferença na abertura das peneiras entre 0,3 mm e 0,75mm. De acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), o módulo de finura mínimo para a classificação do agregado como grão médio é de 3,2. Sendo assim, com o valor obtido de 3,27, o material pode ser classificado como uma areia média a grossa de distribuição contínua.

6.1.2 Método teórico - Füller-Talbot

Realizou-se duas composições granulométricas utilizando este método, sendo estes valores inseridos na Tabela 8. Para ambos os traços, limitou-se o diâmetro máximo (D) igual a 19,1 mm, e para apenas para o Traço C, o diâmetro mínimo (d) ficou limitado à 0,6 mm. O valor da percentagem em peso que passa na peneira de menor diâmetro (%p) foi definido através de interações no Excel, cujo intuito foi de se obter uma curva densa para ambos os traços.

Para o Traço B, este valor é de 14,2%, e para o Traço C é de 25%. Assim, o cálculo do valor exponencial “n” para os dois traços é apresentado nas Equação 22 e Equação 23. O módulo de finura para ambas as curvas granulométricas foi obtido através da massa retida acumulada em cada peneira.

$$n(A) = \frac{\log(\%p) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} = \frac{\log(14,2) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{19,1}\right)} = 0,35 \quad (22)$$

$$n(B) = \frac{\log(\%p) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} = \frac{\log(25) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,6}{19,1}\right)} = 0,40 \quad (23)$$

Tabela 8 - Porcentual de massa passante nas peneiras.

Curva Granulométrica – Traço B		Curva Granulométrica – Traço C	
Peneiras (mm)	% passante	Peneiras (mm)	% passante
19,1	100,00	19,1	100,00
12,7	86,61	12,7	84,92
9,5	78,19	9,5	75,59
6,3	67,65	6,3	64,13
4,8	61,47	4,8	57,51
2,2	46,70	2,2	42,07
1,2	37,72	1,2	25,00
0,6	29,54	0,6	-
0,3	23,14	0,3	-
0,15	18,13	0,15	-

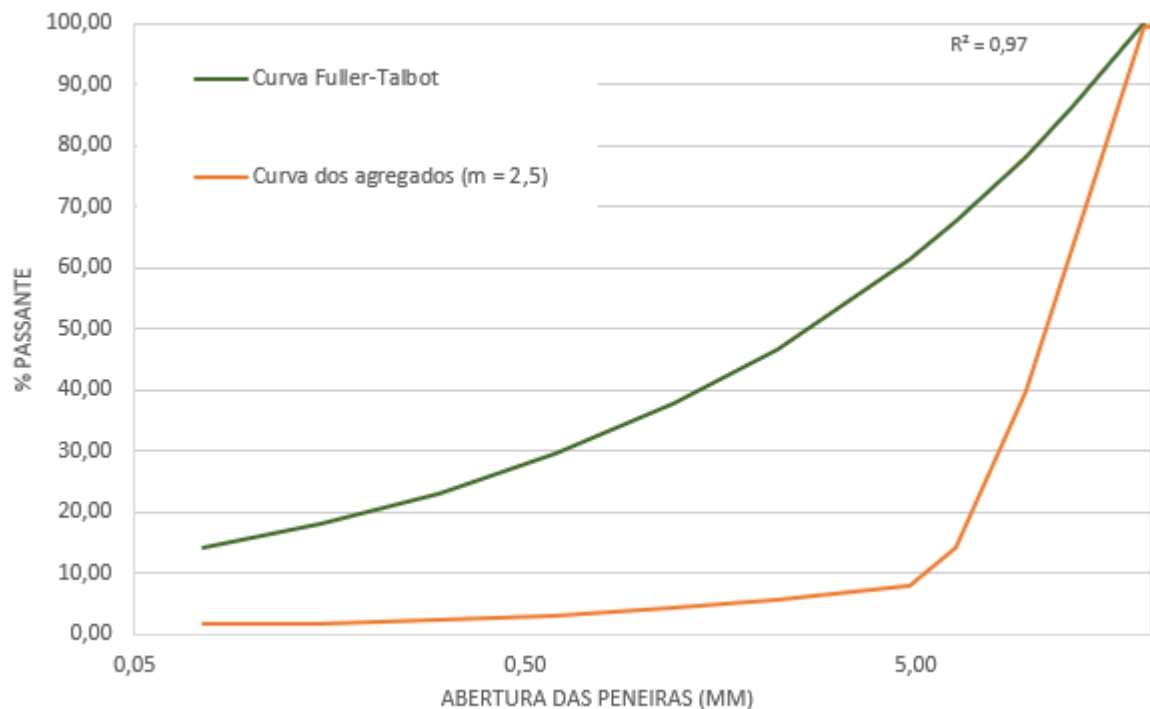
0,075	14,22	0,075	-
Fundo	-	Fundo	-
TOTAL	100,00	TOTAL	100,00

Fonte: O Autor (2021).

Através das porcentagens passantes para cada curva granulométrica, foi possível plotar os gráficos da Figura 24 e Figura 25. O gráfico da Figura 24 apresenta a composição granulométrica utilizada para a realização do Traço B, enquanto o gráfico da Figura 25 foi utilizado para o Traço C.

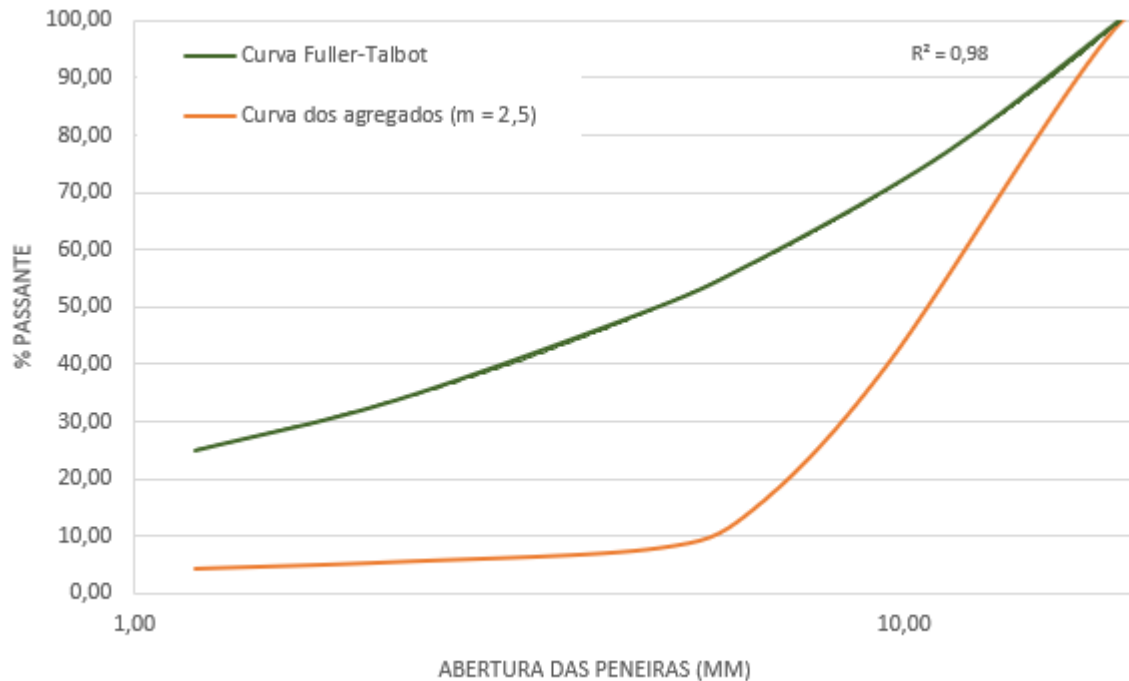
Realizando o somatório das massas retidas nas peneiras para a classificação do agregado graúdo, o Traço B apresentou uma porcentagem de massa retida total de 38,53%, enquanto que para o Traço C este valor foi de 42,49. Com isso, é possível afirmar que o Traço C pode ser considerado com uma maior quantidade de agregado graúdo que o Traço B.

Figura 24 - Composição granulométrica do Traço B.



Fonte: O Autor (2021).

Figura 25 - Composição granulométrica do Traço C.

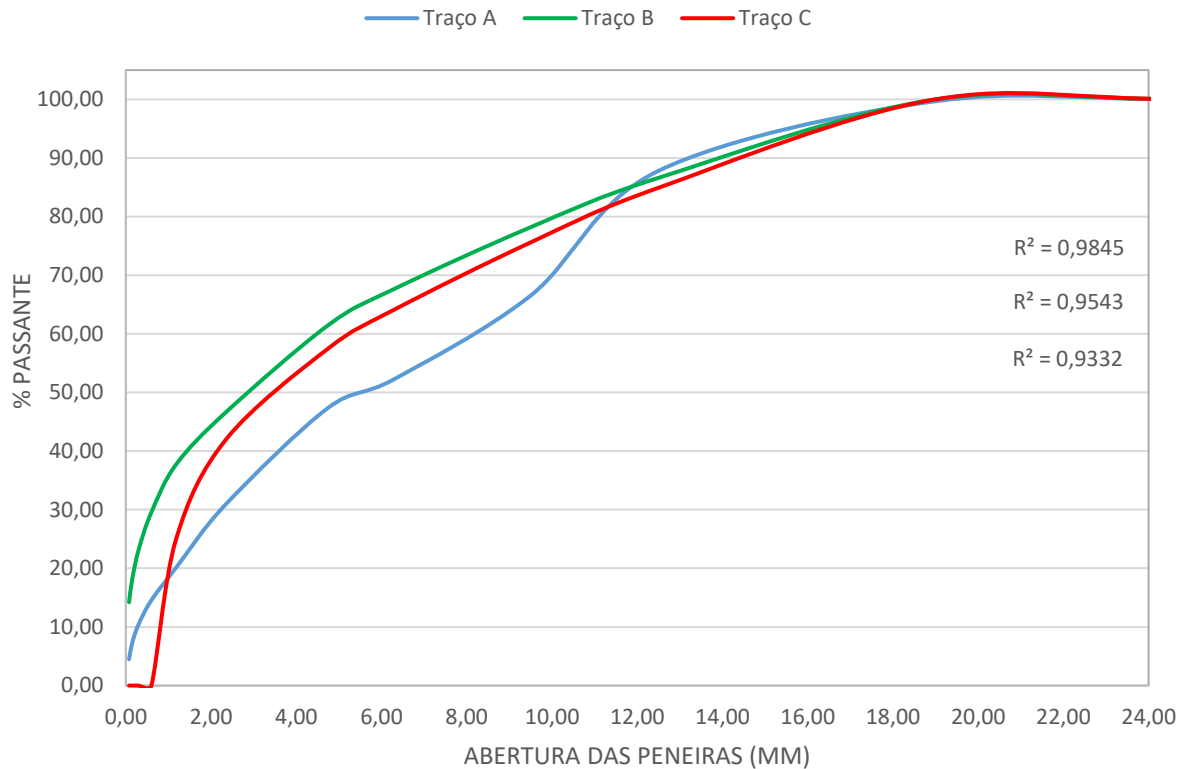


Fonte: O Autor (2021).

É possível afirmar que a granulometria utilizada para o desenvolvimento do Traço C é mais contínua que a granulometria do Traço B. Esperava-se que a granulometria utilizada para o desenvolvimento do Traço B fosse mais contínua que a do Traço C, uma vez que a quantidade de finos presente nessa mistura preenchesse os vazios do agregado graúdo. Com isso, espera-se que a resistência da tração na flexão tenha um melhor comportamento no Traço C, porque o adensamento e a aderência entre os agregados e a pasta de cimento para essa situação, terá um melhor desenvolvimento.

Plotou-se o gráfico da Figura 26 com o intuito de comparar as distribuições granulométricas utilizadas em cada traço. Observa-se que a distribuição mais contínua é a do Traço C, cujo valor de ajustamento da curva é $R^2 = 0,98$.

Figura 26 - Composição granulométrica dos Traços A, B e C.



Fonte: O Autor (2021).

6.1.3 Massa específica do agregado graúdo

Os valores obtidos da massa específica para os agregados graúdos encontram-se na Tabela 9. Os valores obtidos neste ensaio estão coerentes com os materiais comumente utilizados na construção civil.

Tabela 9 - Valores das massas específicas dos agregados graúdos.

	Brita 0	Brita 1
Massa específica do agregado seco	2,61	2,62
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca	2,64	2,63
Massa específica aparente	2,69	2,66
Absorção de água	1,16%	0,56%

Fonte: O Autor (2021).

6.1.4 Massa específica do agregado miúdo

Os resultados obtidos da massa específica para o agregado miúdo estão expressos na Tabela 10. Também é possível afirmar que estes valores obtidos estão coerentes com os materiais utilizados na construção civil.

Tabela 10 - Valores das massas específicas do agregado miúdo.

Areia Industrial	
Massa específica do agregado seco	2,46
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca	2,51
Massa específica aparente	2,67

Fonte: O Autor (2021).

6.1.5 Massa unitária dos agregados

Os resultados da massa unitária para os agregados encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores das massas unitárias dos agregados.

Material	Massa unitária
Areia Industrial	1,75
Brita 0	1,58
Brita 1	1,49

Fonte: O Autor (2021).

6.2 CONCRETO FAST TRACK

6.2.1 Ensaio no estado fresco

6.2.1.1 *Slump Test*

Os resultados obtidos no ensaio do abatimento do tronco do cone estão expressos na Tabela 12. De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), o valor do *Slump Test* para pavimentos rígidos é de 70 ± 10 mm. A Figura 27 apresenta a realização do ensaio para cada concreto.

Figura 27 – Abatimento do concreto: a) Traço – TREF, b) Traço Intermediário – TI, c) Traço Rico – TR, d) Traço A, e) Traço B, f) Traço C.



Fonte: O Autor (2021).

De acordo com Neville e Brooks (2013), a trabalhabilidade de um concreto no estado fresco é influenciada por diversos fatores, são eles: quantidade de água, o tipo e a granulometria dos agregados, a relação agregado/cimento, a presença de aditivos e a finura do cimento. Através da análise da Tabela 12, é possível afirmar que todos os valores obtidos estão dentro da faixa exigida do DNIT, exceto o Traço C que apresentou um valor de 232 mm.

Este resultado do Traço C pode ser explicado devido à maior quantidade de material graúdo utilizado, proporcionando assim, uma menor quantidade de partículas no concreto e uma menor superfície específica. O que causa um menor atrito entre as partículas e, conseqüentemente, acarretará em uma maior quantidade de água livre e também maior exsudação em relação aos Traços A e B.

Tabela 12 - Valores obtidos no ensaio do *Slump Test*.

Nome	<i>Slump</i> (mm)
Traço - TREF	80
Traço - TI	80
Traço -TR	78
Traço A	79
Traço B - Füller-Talbot	80
Traço C - Füller-Talbot	232

Fonte: O Autor (2021).

6.2.1.2 Determinação da massa específica aparente, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico

Os resultados da massa específica aparente, do rendimento e do teor de ar estão expressos na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores obtidos no ensaio.

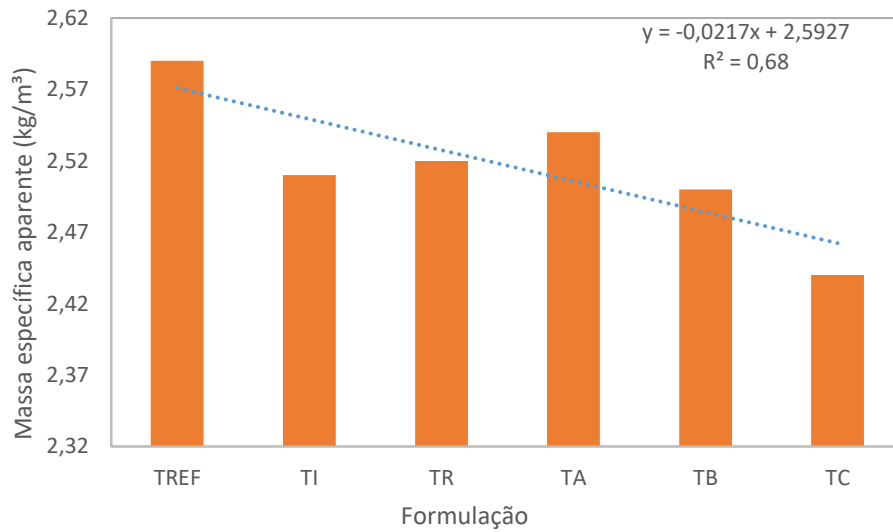
	Traço - TREF	Traço - TI	Traço - TR	Traço A	Traço B	Traço C
Massa específica (kg/m³)	2,59	2,51	2,52	2,54	2,50	2,44
Rendimento (m³)	38,40	37,48	31,90	18,55	20,32	16,61
Consumo de cimento (kg/m³)	0,53	0,74	0,88	0,64	0,63	0,61
Volume total (m³)	40,79	40,78	36,21	20,25	22,08	18,54
Índice de ar	0,94	0,92	0,88	0,92	0,92	0,90
Teor de ar (%)	6,38	8,70	9,12	8,70	8,70	11,12

Fonte: O Autor (2021).

Através dos resultados obtidos da Tabela 13, foi possível plotar o gráfico da Figura 28 que apresenta a massa específica aparente para cada formulação, e o gráfico da Figura 29 que ilustra o teor de ar incorporada para as formulações.

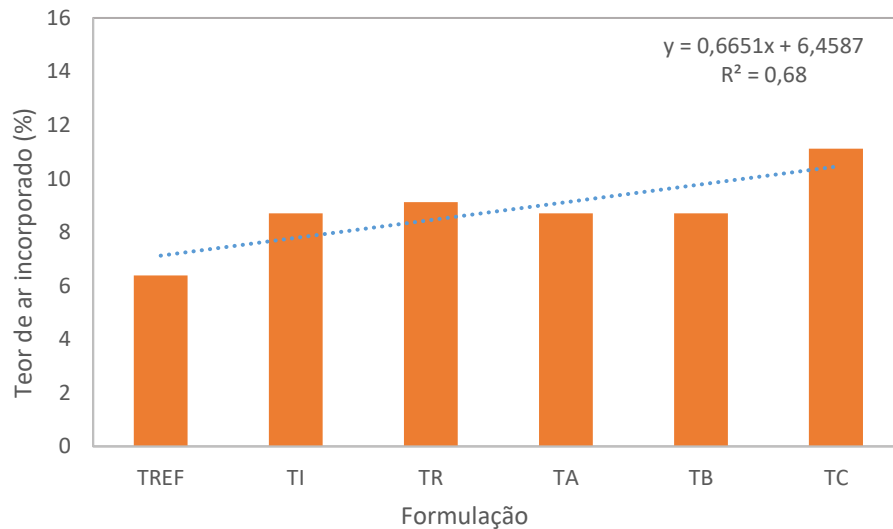
Por meio da análise dos gráficos da Figura 28 e Figura 29, é possível afirmar que a massa específica aparente do concreto é inversamente proporcional ao teor de ar incorporado. Este fato pode ser explicado devido a granulometria do material, isto é, quanto mais contínua e linear for a granulometria do material, menor o índice de vazios e menor será a massa específica do concreto. Para ambos os gráficos, a equação linear envolve 68% dos resultados obtidos.

Figura 28 - Massa específica aparente para cada formulação.



Fonte: O Autor (2021).

Figura 29 - Teor de ar incorporado para cada formulação.

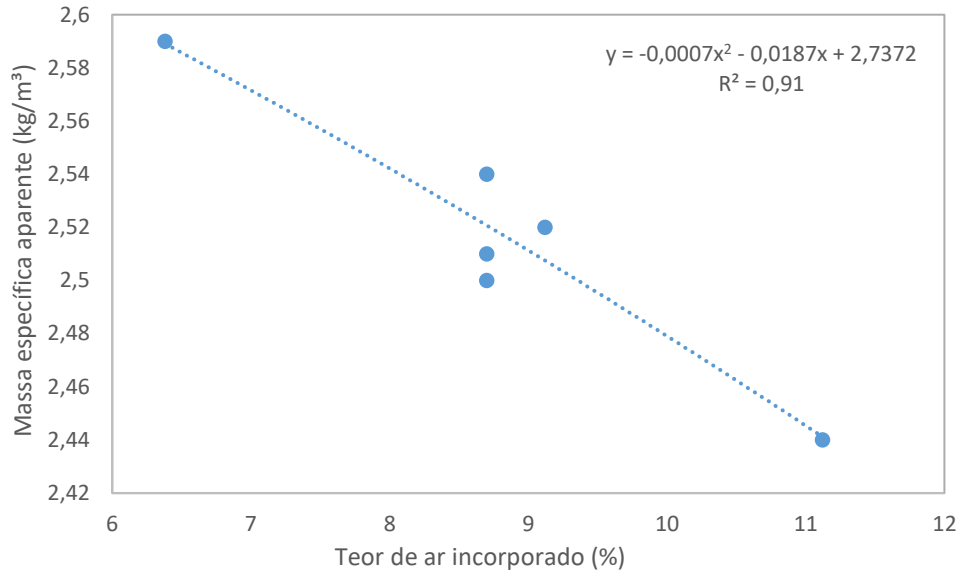


Fonte: O Autor (2021).

A correlação entre a massa específica aparente e o teor de ar incorporado foi realizada através do gráfico da Figura 30, no qual a equação linear explica adequadamente 91% desses resultados. A massa específica aparente do concreto é inversamente proporcional ao teor de ar incorporado, ou seja, quanto maior for a quantidade de ar incorporado no concreto, conseqüentemente menor será a massa específica. Este fato pode ser explicado devido ao aumento do número de vazios e a desincorporação do ar aprisionado no interior do concreto, em ambos os casos,

estes fatores auxiliam no aumento da massa específica aparente do concreto no estado fresco.

Figura 30 - Correlação entre a massa específica aparente e o teor de ar incorporado.



Fonte: O Autor (2021).

6.2.2 Ensaios no estado endurecido

6.2.2.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica foram realizados para os Traços A, B e C, porque apenas para esses traços realizaram-se a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão axial. Os resultados encontram-se expressos na Tabela 14.

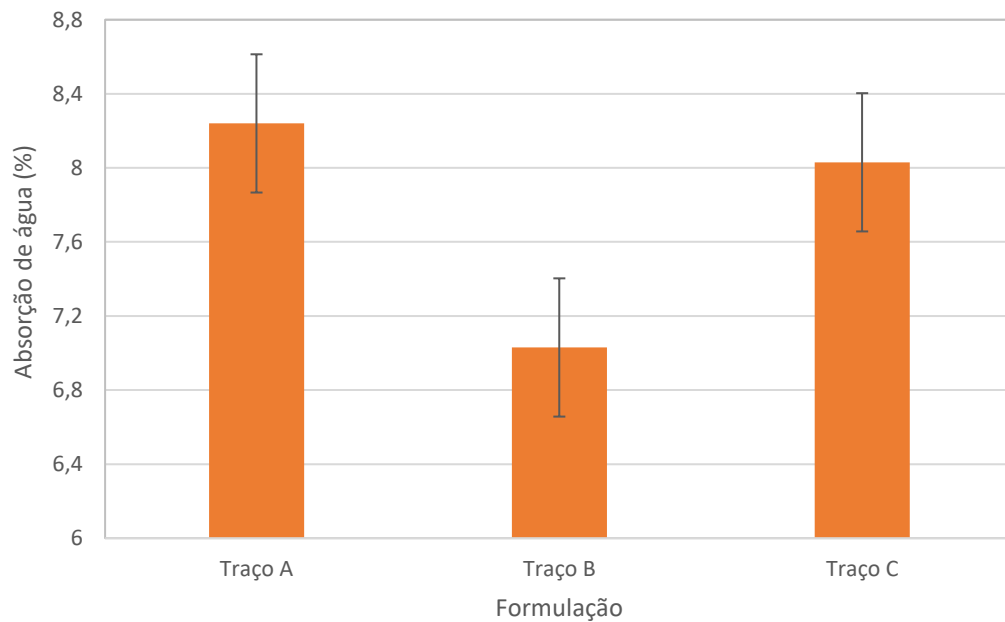
Tabela 14 – Valores obtidos no ensaio.

	Traço A	Traço B	Traço C
Absorção de água (%)	8,24	7,03	8,03
Índice de vazios (%)	16,11	15,37	14,28
Massa específica da amostra seca (g/cm³)	1,95	2,19	2,15
Massa específica da amostra saturada (g/cm³)	2,12	2,34	2,58
Massa específica real (g/cm³)	2,33	2,58	2,60

Fonte: O Autor (2021).

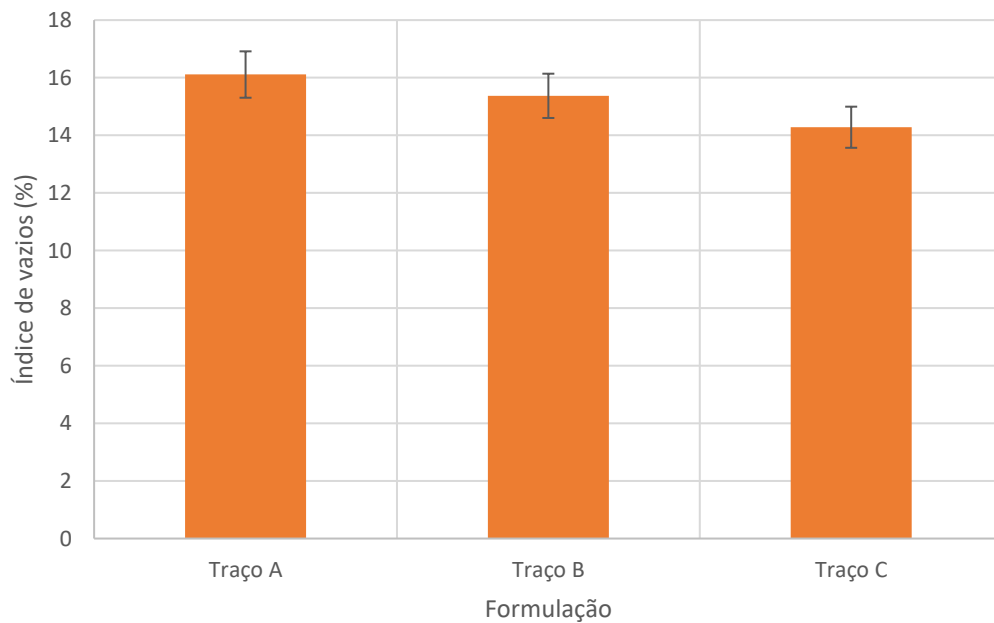
Através dos resultados obtidos na Tabela 14, foi possível gerar o gráfico da Figura 31 que apresenta a absorção de água, o gráfico da Figura 32 correspondente ao índice de vazios e o gráfico da Figura 33, este para os valores da massa específica obtida para cada traço.

Figura 31 - Absorção de água para cada formulação.



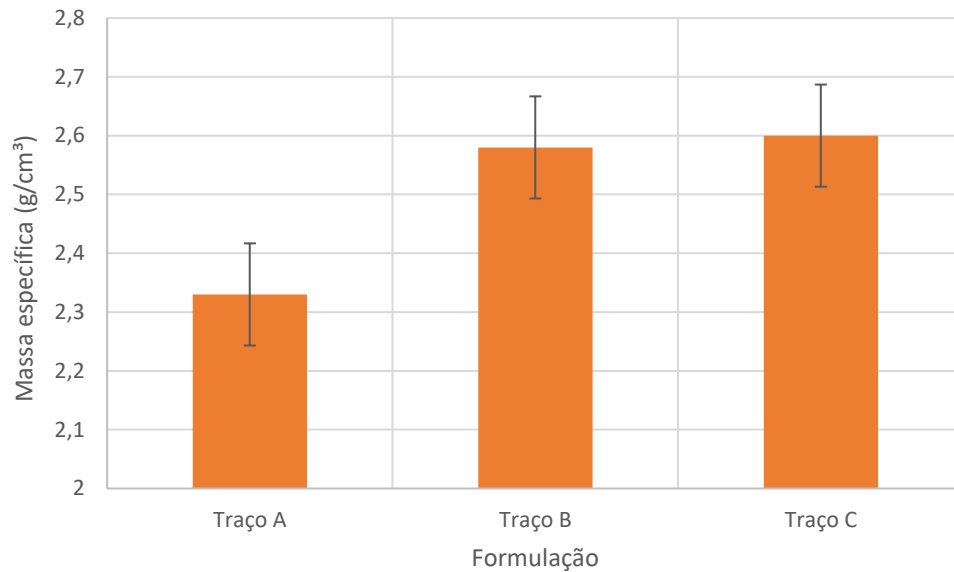
Fonte: O Autor (2021).

Figura 32 - Índice de vazios para cada formulação.



Fonte: O Autor (2021).

Figura 33 - Massa específica para cada formulação.



Fonte: O Autor (2021).

Pela análise dos gráficos anteriores, é possível afirmar que a massa específica do concreto é inversamente proporcional ao índice de vazios. Isto é, quanto menor a massa específica do concreto endurecido, maior será a porosidade. Por outro lado, a absorção de água é diretamente proporcional ao índice de vazios. Os valores obtidos da massa específica desses concretos assemelham-se aos valores e comportamentos dos concretos convencionais.

6.2.2.2 Resistência à Compressão Axial

Os resultados obtidos para o ensaio de compressão estão contidos na Tabela 15.

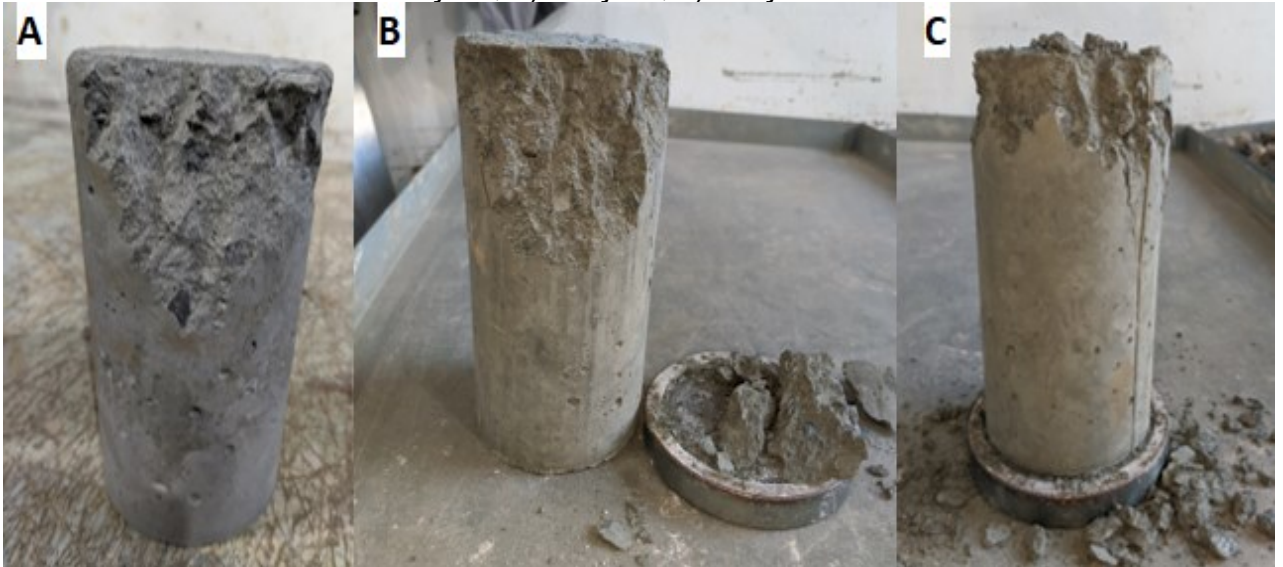
Tabela 15 - Valores obtidos para o ensaio de compressão axial.

Traço A		Traço B		Traço C	
Idade	fc (MPa)	Idade	fc (MPa)	Idade	fc (MPa)
12 horas	8,19	12 horas	2,14	12 horas	1,91
	8,24		2,24		2,10
1 dia	17,34	1 dia	11,95	1 dia	10,90
	17,51		12,35		12,03
7 dias	28,93	7 dias	37,15	7 dias	33,97
	32,38		39,06		34,94
28 dias	37,96	28 dias	42,28	28 dias	39,33
	38,46		46,28		43,87

Fonte: O Autor (2021).

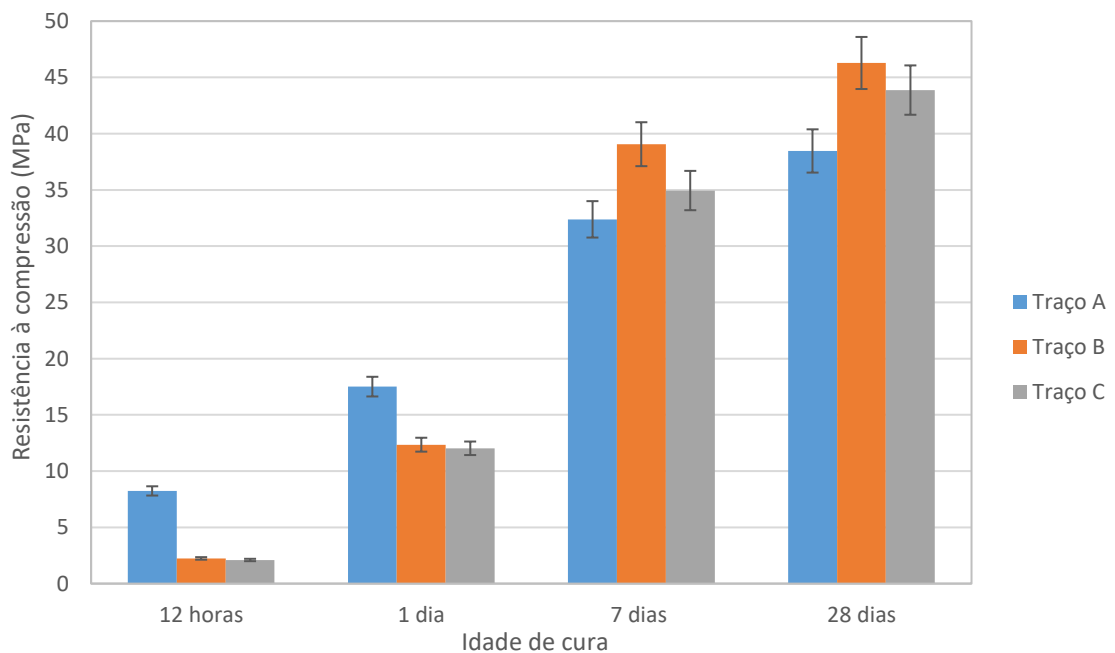
A Figura 34 apresenta os corpos de prova logo após a realização do ensaio de compressão na idade de 12 horas. A Figura 35 contém o comparativo das resistências a compressão nas diferentes idades de rompimento.

Figura 34 - Corpos de prova rompidos na compressão axial na idade de 12 horas: a) Traço A, b) Traço B, c) Traço C.



Fonte: O Autor (2021).

Figura 35 - Valores obtidos para o ensaio de compressão axial.



Fonte: O Autor (2021).

A compressão do concreto é um ensaio de resistência de fácil realização, o valor desse resultado é intrinsecamente importante para analisar as características desejáveis do concreto endurecido (NEVILLE E BROOKS, 2013). Observou-se que para o Traço A, a resistência da compressão nas primeiras idades foi muito superior em relação aos outros traços. Os corpos de prova dos Traços A, B e C apresentaram 8,53%, 2,24% e 2,26 % da resistência total para cada formulação na idade de 12 horas. O Traço A apresentou uma resistência de 367,86% maior que o Traço B em 12 horas, e 392,38% maior que o Traço C.

O concreto do Traço B apresentou a maior resistência a compressão em 28 dias. O acréscimo de resistência total para esta idade obtida pelos Traços A, B e C foi, a saber: 39,82%, 46,31% e 47,20%, respectivamente. Enquanto o acréscimo de resistência da formulação B em relação as formulações A e C foi de 1,20 % e 1,05%.

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT) (2005), para pavimentos estruturalmente armados, a resistência característica à compressão axial exigida é de 30 MPa. Conforme os resultados expostos na Tabela 15, todos os traços atendem este requisito de resistência para a idade de 7 dias.

Para Mehta e Monteiro (1994), quatro fatores importantes estão relacionados com a influência da resistência à compressão axial dos concretos, sendo eles: relação água/cimento, porosidade, hidratação do cimento e o agregado graúdo. Para todos os traços a relação água/cimento foi mantida constante. Entretanto, para o Traço A, considerando uma maior quantidade de vazios ocasionados pela porosidade, em relação ao Traço B, a hidratação das moléculas de cimento na zona de transição ocorreu de uma maneira mais significativa para as idades de 12 horas e 1 dia. A maior quantidade de agregado graúdo na formulação A em relação a formulação B, também auxiliou nessa maior resistência inicial.

Segundo Isaia (2005), a relação água/cimento é um fator primordial para a determinação da porosidade de um concreto, sendo que um menor número de vazios da pasta de cimento hidratada, ocasiona em uma maior resistência do concreto. Este fator é importante para explicar a maior resistência para o Traço B no ensaio de compressão em 7 e 28 dias. Isto é devido à maior quantidade de finos desse traço e, conseqüentemente, um menor índice de vazios que o Traço A.

O Traço C apresentou uma variação de apenas 1,05% da resistência total em 28 dias em relação ao Traço B. O abatimento do tronco de cone deste traço foi de 23,2 cm, mantendo a mesma relação água/cimento. Com isso, é possível afirmar

que se espera uma maior resistência total de compressão para este traço se a relação água/cimento for diminuída.

6.2.2.3 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão estão expressos na Tabela 16.

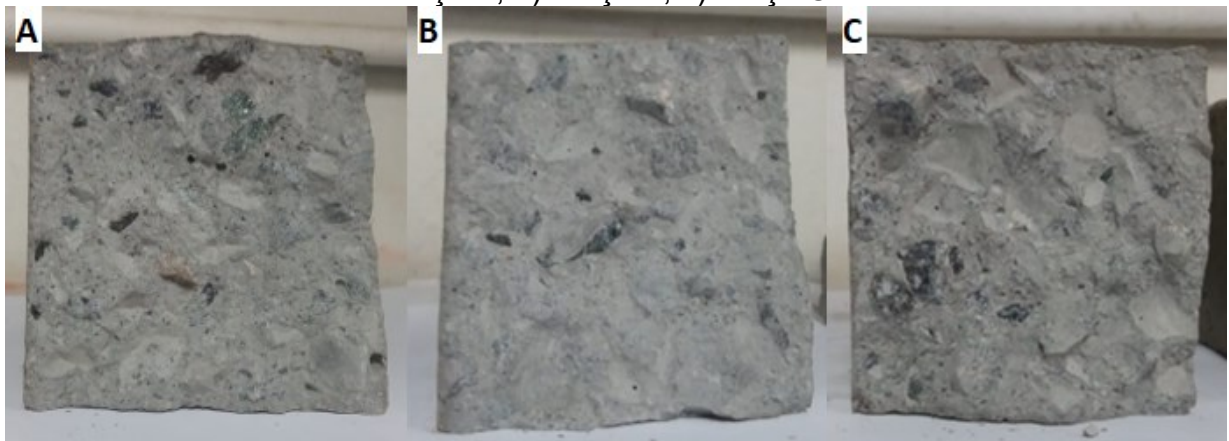
Tabela 16 - Valores obtidos para o ensaio de tração na flexão.

Traço A		Traço B		Traço C	
Idade	ft,f (MPa)	Idade	ft,f (MPa)	Idade	ft,f (MPa)
12 horas	2,53	12 horas	1,06	12 horas	0,65
	2,59		1,15		0,77
	2,68		1,29		0,85
1 dia	2,88	1 dia	2,50	1 dia	2,09
	3,00		2,56		2,15
	3,12		2,62		2,27
7 dias	3,68	7 dias	2,68	7 dias	5,27
	3,77		2,80		5,42
	3,94		2,88		5,53
28 dias	4,05	28 dias	5,03	28 dias	5,71
	4,11		5,27		6,36
	4,18		5,42		6,42

Fonte: O Autor (2021).

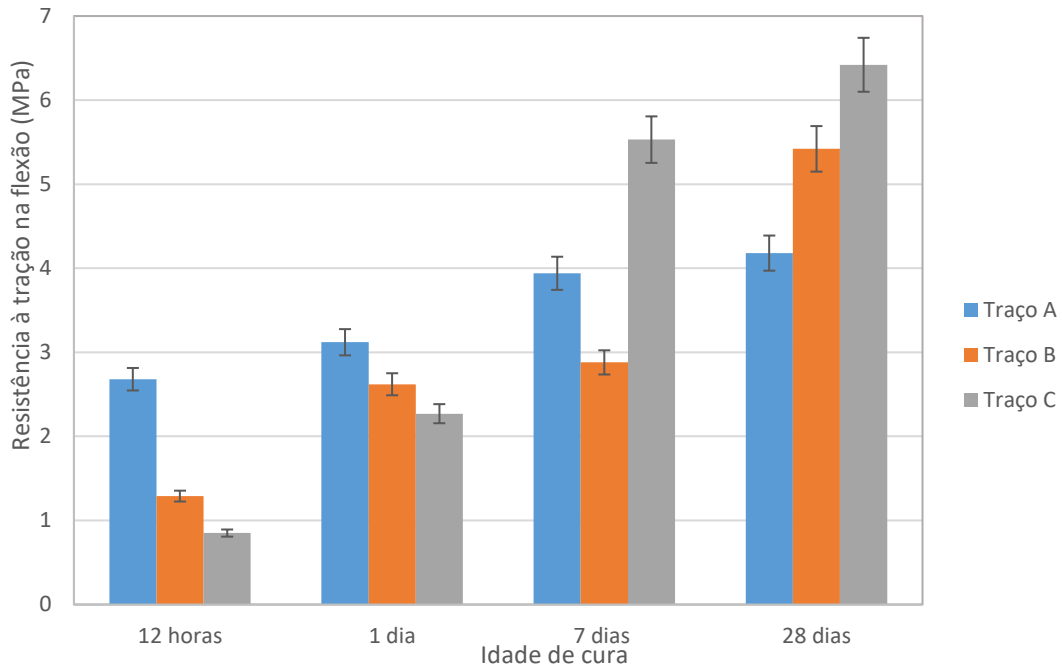
A Figura 36 apresenta os corpos de prova logo após a realização do ensaio de tração na flexão na idade de 12 horas. A Figura 37 contém o comparativo das resistências de tração na flexão nas diferentes idades de rompimento.

Figura 36 - Corpos de prova rompidos à tração na flexão na idade de 12 horas: a) Traço A, b) Traço B, c) Traço C.



Fonte: O Autor (2021).

Figura 37 - Valores obtidos para o ensaio de tração na flexão.



Fonte: O Autor (2021).

A maior resistência observada para a idade de 12 horas foi para o Traço A. Como citado anteriormente, o valor mínimo sugerido por Godinho e Grossi (2000) para a liberação do tráfego em Iowa (EUA) é de 2,5 MPa no ensaio de tração na flexão. Com os valores obtidos, é possível afirmar que apenas o Traço A apresentou as características necessárias para a classificação deste concreto como *Fast Track*. O Traço B alcançou este valor mínimo na idade de 1 dia, enquanto o Traço C em 7 dias.

Analisando as resistências finais é possível apontar alguns fatores críticos no Traço A e C. Para o Traço A, notou-se uma maior resistência inicial na idade de 12 horas, porém a longevidade desse concreto não é garantida na utilização em pavimentos rígidos, isto porque a resistência em 28 dias apresentou uma menor resistência à flexão que a proposta pelo Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT) (2005). Para o Traço C, mesmo este sendo a dosagem que apresentou as maiores resistências finais, é possível afirmar a complicação de sua utilização. Isto porque este traço apresenta uma estabilidade granulométrica pobre e muito graúda, que a curto prazo pode facilitar a percolação da água para as camadas adjacentes e, conseqüentemente, facilitar a patologia das placas de concreto através da formação de degraus ao longo da rodovia.

Para a idade de 12 horas, os Traços A, B e C alcançaram uma porcentagem de 19,25%, 10,57% e 5,64% da resistência total, respectivamente. Sendo que a formulação A obteve 207,75% mais resistência em relação à formulação B, e 315,29% mais que a formulação C.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) e Neville e Brooks (2013), os valores das resistências de compressão axial e de tração na flexão podem ser relacionados entre si. Com isso é possível afirmar que os fatores e parâmetros que influenciam nessas resistências são similares.

O Traço A apresentou uma maior absorção de água em comparação aos outros traços. A absorção de água é um fator relevante para a hidratação do cimento e, conseqüentemente, uma maior resistência inicial. Esta formulação, diferentemente das outras, não teve o controle das porcentagens retidas acumulada em cada peneira. De acordo com as observações realizadas por Weidmann (2008), os agregados com forma arredondada, por possuírem menor superfície específica e menor atrito entre partículas, conduziram a redução da demanda de água e maior resistência inicial. Este fator também influenciou na maior resistência do concreto na idade de 12 horas, porque diferentemente dos Traços B e C, sabe-se que a quantidade de brita 0, que de acordo com a Figura 8 pode ser considerada com geometria arredondada, foi exatamente de 50% para a fabricação dessa formulação.

O Traço C obteve 42,60% de acréscimo da resistência total em 28 dias. Em comparação com os Traços A e B, esta formulação apresentou um acréscimo de 154% e 119% de resistência, respectivamente.

Para Weidemann (2008), pode-se concluir que alterações na composição granulométrica e na forma dos agregados miúdos de britagem podem influenciar significativamente o desempenho de concretos. A formulação C apresentou uma absorção de água intermediária, comparada com os outros traços. Isto pode ser explicado devido a maior quantidade de agregado graúdo, o que ocasiona menor retenção de água. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a maior quantidade de agregado graúdo no concreto também influencia na resistência do mesmo.

Observou-se um *Slump* de 23,2 cm para o Traço C, sendo que a relação água/cimento foi mantida constante. O índice de vazios foi o menor dentre as formulações. Com isso, é possível prever que a resistência desse traço pode ser ainda maior se o número de vazios for diminuído através da redução da relação água/cimento.

7 CONCLUSÃO

Sabendo da necessidade da utilização de materiais selecionados para a fabricação de concretos com alto desempenho para pavimentos rígidos, este estudo teve o intuito de comparar a influência dos agregados nas diferentes formulações de concreto.

No estado fresco, os Traços A e B apresentaram um valor de *Slump* dentro do estabelecido pelo Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005). Este parâmetro para o Traço C foi o maior dentre as formulações, isto pode ser explicado pela maior quantidade de agregado graúdo utilizado na composição dessa formulação. A massa específica e o volume total deste traço foram menores comparadas com os Traços A e B, e isto também pode ser explicado devido a quantidade maior de brita utilizada. Para as três formulações, observou-se um concreto coeso e sem segregação e, apenas para o Traço C, teve-se uma leve exsudação da pasta de cimento em relação com os agregados. Observou-se uma melhor trabalhabilidade para este traço.

No estado endurecido, observou-se um comportamento diferente das resistências para cada formulação nos ensaios de compressão axial e de tração na flexão. O Traço A obteve as maiores resistências nestes ensaios para as idades de 12 horas e um dia. Para as idades de 7 e 28 dias, o Traço B apresentou as maiores resistências para o ensaio de compressão, enquanto o Traço C alcançou os maiores valores no ensaio de tração na flexão. O consumo de cimento para os Traços A, B e C foi de: 639,80 kg/m³, 629,72 kg/m³ e 614,61 kg/m³, respectivamente.

Com base nos critérios para a liberação do tráfego em pavimentos rígidos, é possível afirmar que apenas o Traço A atingiu a resistência mínima em 12 horas. Entretanto, as formulações B e C também podem ser utilizadas para a aplicação em pavimentos rígidos com uma idade maior de cura.

Portanto, conclui-se que houve uma melhora na resistência dos traços utilizando o método de Füller-Talbot para as idades de 7 e 28 dias, e que todos os traços estudados podem ser utilizados no estudo e aplicação de pavimentos rígidos.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização deste trabalho, citam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Uso de adições minerais para pavimentos de concreto *Fast Track*, a fim de reduzir o consumo de cimento e, conseqüentemente, o custo total;
- Avaliar o comportamento dos traços através da redução da relação água/cimento e a incorporação de aditivos químicos;
- Estudo da influência dos agregados miúdo e graúdo em outros traços para a utilização em pavimentos rígidos;
- Utilização de outros métodos de dosagem com o intuito de alcançar uma granulometria mais contínua e maior resistência.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do Cimento Portland**. Boletim técnico, São Paulo, n.106, 2002.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **Accelerated Rigid Paving Techniques**. Concrete Paving Technology: Fast Track Concrete Pavements. Special Project 201, FHWA-SA-94-080, 1994.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. 2 ed. Rio de Janeiro: 2015.

_____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação**. São Paulo, 1982.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. 2 ed. Rio de Janeiro: 2009.

_____. **NBR 7217: Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados**. Rio de Janeiro: 1987.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. 2 ed. Rio de Janeiro: 2009.

_____. **NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. 2 ed. Rio de Janeiro: 2010.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: 2018.

_____. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: 1998.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **ASTM C 125-93: Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards, 1993.

_____. **ASTM C 33: Standard Specification for Concrete Aggregate**. Annual Book of ASTM Standards, 2012.

_____. **ASTM C 494: Specification for Chemical Admixtures for Concrete**. Annual Book of ASTM Standards, 1992.

ANDRADE, J.; TUTIKIAN, B. F. **Resistência mecânica do concreto**. 2013. Disponível em: <https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/2538762/mod_resource/content/1/Cap17%20-%20Resist%C3%A2ncia%20mec%C3%A2nica%20do%20concreto.pdf>. Acesso em: 18 set. 2020.

ANSARI, F.; LUKE, A.; VITILLO, N. P.; BLANK, N.; TURHAN, I. Developing *Fast Track* Concrete for Pavement Repair. **Concrete International**. p. 24-29, May 1997.

AZEVEDO, Â. A. **Proposta para simplificação de ensaios destrutivos e não-destrutivos para o monitoramento do ganho de resistência de pavimentos de concreto para *fast-track***. 2008. 254p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BALBO, J. T. Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento Estrutural de Pavimentos de Concreto Simples, **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, São Paulo, 2004, 20p.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projetos e restauração**. São Paulo, Oficina de Textos, 2009.

BARRA, B. S. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com o emprego de pó calcário**. 2005. 202 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2005.

BATTAGIN, Arnaldo. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2009. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4842270/mod_resource/content/0/capitulo%206%20Cimento%20A%20Battagin.pdf>. Acesso em: 07 set. 2020.

BERNUCCI, L.B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiro**. Ed 1. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

BERNUCCI, Liedi B.; MOTTA, Laura M. G.; CERATTI, Jorge A. P.; SOARES, Jorge B. **Pavimentação Asfáltica – formação básica para engenheiros**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, Imprinta, 2010.

BULL, J. W.; WOODFORD, C. H. Design of Precast Concrete Pavement Units for Rapid Maintenance of Runways. **Computer & Structures**, Vol. 64, No. 1-4, pp. 857-864, 1997.

CARVALHO, M.D. **Pavimento de concreto: reduzindo o custo social**. Vias concretas, São Paulo 2012. Disponível: <http://viasconcretas.com.br/cms/wpcontent/uploads/2013/02/2007_Artigo_Pavimento-de-concreto_Reduzindo-o-custosocial.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte Rodoviário: Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Disponível: <<http://anut.org/wp-content/uploads/2017/10/Pavimentos.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa Rodoviária 2005**. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 19 ago. 2020.

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DA UFPR. **Transporte B - Tipos de pavimentos**. 2009. Disponível em: <<http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/mod1Introducao.pdf>.> Acesso em: 06 set. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentos rígidos**. 2.ed. 234 p. Rio de Janeiro, 2005. (IPR. Publ, 714).

_____. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. 278 p. Rio de Janeiro, 2006. (IPR. Publ, 719).

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, **Accelerated Rigid Paving Techniques**, Special Project 201, FHWA-SA-94-080, 1994.

FUNDAÇÃO DOM CABRAL. **Custos Logísticos no Brasil**. Disponível em: <<https://www.fdc.org.br/conhecimento-site/nucleos-de-pesquisa/site/Materiais/pesquisa-custos-logisticos2017.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2020.

GODINHO, D. P.; GROSSI, L. C. **Pavimento de concreto para liberação rápida ao tráfego (*fast-track*)**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MANUTENÇÃO E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS E CONTROLE TECNOLÓGICO, 2000, São Paulo.

HELENE, P; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349p.

HENDRIKX, L. Use of *Fast-track* Concrete Paving for Restoration Work. In: **International Symposium on Concrete Roads**, 8th. Lisbon, 1998. Theme II – Progress in Concrete Road Materials and in the Construction Process, p 69-71.

HIGGINS, D. **Repairs to reinforced concrete**. Concrete; 1982. ISSN 0010-5317, Vol. 16, p.36.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1940. **Reconstituição de traço de concreto e argamassas**. São Paulo: IPT, set. p.75-84. (IPT - Publicação, 103 - Boletim, 25).

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v. 1968 p.

_____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. 600 p.

JONES, K. **Special Cements for Fast Track Concrete**. Iowa Department of Transportation, June, 1988.

KOSMATKA, S.; PARARESE, W. **Design and Control of Concrete Mixtures**. Thirteenth Edition, EB001.13T, Portland Cement Association, Skokie, IL, 1988.

MARQUES, G. L. de O., **Terminologia e Classificação dos Pavimentos**. Curso Básico Intensivo de Pavimentação Urbana – Módulo I. Juiz de Fora, 2002.

MEDINA, J., **Mecânica dos Pavimentos**. 1ª edição, 380 p. Rio de Janeiro, 1997. Editora UFRJ.

MEHTA P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MENDES, C. B. A.; NUNES, F. R. **Asfalto Borracha – Minimizando os impactos ambientais gerados pelo descarte de pneus inservíveis no meio ambiente**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção - Civil) – Faculdade Brasileira – UNIVIX – Vitória, 2009.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 466 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 466 p.

OLIVEIRA, P. L. d. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos de concreto**. 2010. 246p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PAIXÃO, M. P.; CORDEIRO, C. C. C.; CORREIA, M. C. N. **Pavimentos Semirrígidos: Prevenção e tratamento da reflexão de trincas**. Seminário Estudantil de Produção Acadêmica (Graduação em Engenharia Civil) - UNIFACS - Campus Feira, 2017.

PETRUCCI, E. G. **Concreto de Cimento Portland**. Porto Alegre: Editora Globo, 1971.

RHEINHEIMER, V. **Utilização de ensaios não destrutivos no controle tecnológico de execução de pavimentos de concreto tipo *Fast-track***. 2007. 266p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, L. F. A. **Pavimentos aeroportuários: análise de soluções rígidas e de soluções flexíveis**. 2009. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade de Aveiro, 2009.

SILVA, P. F. A.; ARRUDA, V.; BARBIERI, M. Pavimento de Concreto: “*Fast-track*”. In: **Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON (CD Room)**, Rio de Janeiro, 2006.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2 v. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland.** Florianópolis, 2008. 273 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

WHITING, D.; NAGI, M.; OKAMOTO, P. A. Early Strength Gain of Rapid Highway Repair Concrete. **Concrete International.** p 28-35, August, 1994.