

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOCILEILA LIMA SANTOS

**ESTUDO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM
ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS**

Campo Mourão, PR

2021

JOCILEILA LIMA SANTOS

**ESTUDO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM
ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Dra. Fabiana Goia Rosa De Oliveira

Campo Mourão, PR

2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

por

Jocileila Lima Santos

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 17 horas do dia 29 de abril de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luis Nunes De Goes

(UTFPR)

Prof^a. Dr^a. Fabiana Goia Rosa de Oliveira

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Paula Cristina Souza

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida e por me dar forças e coragem durante toda a jornada até aqui. Agradeço, especialmente, aos meus pais, Alzira e Agostinho, por serem meu alicerce ao longo da vida; pelo amor; pela paciência, e por proporcionar todas as condições para o desenvolvimento de meus sonhos e objetivos. Aos meus queridos irmãos, Joab e Keila por todo apoio, incentivo também e acreditarem nos meus sonhos.

À minha querida orientadora, professora Fabiana Goia, pela confiança depositada, por ser uma profissional ilustre, exemplo de motivação e dedicação.

Gratidão pelas amizades que fiz ao longo do curso e que contribuíram tanto para minha formação pessoal e profissional, meus amigos Ana Lara, Vitória, Diogo e em especial Marco Antonio, Tawane e Mariana Samira que estiveram presentes em tantos momentos além do ambiente universitário dando todo apoio.

É notório que nestas poucas linhas não serão descritas ou até mesmo citadas todas as pessoas e profissionais que foram fundamentais para essa conquista, e que estiveram diretamente envolvidos no crescimento pessoal e profissional desde o começo deste curso. Desta forma, agradeço a todas as pessoas que me apoiaram direta e indiretamente ao longo desta caminhada, compreendendo os momentos de ausência e me incentivando e dando forças para superar os momentos de dificuldades.

RESUMO

A construção civil vem, aperfeiçoando suas técnicas construtivas e como consequência veio o avanço tecnológico que hoje está disseminado pelo mundo. Junto com o avanço no setor e nas técnicas construtivas também veio o aumento do consumo de recursos naturais e a geração acentuada de resíduos. Em busca do desenvolvimento sustentável surge a necessidade da utilização de componentes na construção que minimizem a utilização de recursos naturais. O concreto é amplamente utilizado, e na evolução na tecnologia do concreto surge o concreto de alto desempenho. O concreto de alto desempenho tem sido cada vez mais utilizado na construção civil, além de ser objeto de estudo considerando a complexidade em atingir o altas resistências. Esta procura se justifica pelos diversos benefícios que este material possibilita dentre elas são a elevada resistência mecânica e excelente durabilidade, o que resulta em redução das seções de peças comprimidas e ganho de área útil. É notório o estudo com o objetivo de esclarecer dúvidas sobre o teor ótimo de aditivo, relação água/cimento, consumo de cimento e agregados que proporcionem trabalhabilidade adequada ao concreto no estado fresco e excelentes propriedades ao concreto endurecido. Neste trabalho desenvolveu-se um estudo dos materiais constituintes do concreto de alto desempenho, sugerindo a utilização de agregado reciclado de resíduos de corte e beneficiamento de mármore e granito como substituição parcial de agregados miúdos na dosagem.

Palavras – chave: Concreto de alto desempenho, Agregado reciclado, Resíduos de corte e beneficiamento de mármore.

ABSTRACT

Civil construction has been improving its construction techniques and as a consequence came the technological advancement that is now widespread in the world. Along with the advancement in the sector and in construction techniques, there was also an increase in the consumption of natural resources and a marked generation of waste. In search of sustainable development, there is a need to use components in construction that minimize the use of natural resources. Concrete is widely used, and in the evolution of concrete technology, high performance concrete arises. High performance concrete has been increasingly used in civil construction, in addition to being the object of study considering the complexity of reaching high strengths. This search is justified by the several benefits that this material allows, among them are the high mechanical resistance and excellent durability, which results in a reduction in the sections of compressed parts and gain of useful area. The study is notorious in order to clarify doubts about the optimum content of additive, water / cement ratio, consumption of cement and aggregates that provide adequate workability to concrete in the fresh state and excellent properties to hardened concrete. In this work, a study of the constituent materials of high performance concrete was developed, suggesting the use of recycled aggregate from marble and granite cutting and processing residues as partial replacement of fine aggregates in the dosage.

Keywords: High performance concrete, recycled aggregate, marble cutting and beneficiation residues.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução média da resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.	18
Figura 2: Comportamento da resistência à compressão do concreto com diferentes teores de sílica ativa e de metacaulim de alta reatividade.	27
Figura 3: Fatores básicos do processo de dosagem.	28
Figura 4: Resultados de resistência à compressão aos 03, 07, 28 e 60 dias...	29
Figura 5: Peneirador automático	32
Figura 6: Amostra de agregado separadas por peneiramento	33
Figura 7: Caixa de decantação dos resíduos gerados	37
Figura 8: Resíduo coletado na forma de lama.....	37
Figura 9: Amostra de resíduo seca	37
Figura 10: Agregados graúdos, brita 0 e brita 1.	40
Figura 11: Agregados.....	40
Figura 12: Ensaio determinação da massa unitária	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes diferentes de concreto de alto desempenho	16
Tabela 2: Compostos principais do cimento Portland	17
Tabela 3: Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa) Designação	18
Tabela 4: Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.	20
Tabela 5: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	21
Tabela 6: Traço e misturas do concreto de alto desempenho com agregado reciclado.....	29
Tabela 7: Análise granulométrica, amostra de areia fina	33
Tabela 8: Análise granulométrica, amostra de areia grossa.	34
Tabela 9: Análise granulométrica, agregado reciclado.....	38
Tabela 10: Análise granulométrica, agregado graúdo brita 0.	41
Tabela 11: Análise granulométrica, agregados graúdos brita 1.	41
Tabela 12: Massa unitária das amostras de agregados ensaiadas.....	44

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

f_{ckj}	Resistência característica à compressão do concreto
MPa	Megapascal
E_{ci}	Módulo de elasticidade inicial
E_{cs}	Módulo de deformação secante
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
α	Alfa
E	Modulo de elasticidades
NM	Norma MERCOSUL
CAD	Concreto de Alto Desempenho
ACI	American Concrete Institute
Ca (OH)2	Hidróxido de cálcio
C ₃ S	Silicato de tricálcio
C ₄ AF	Alumino ferrato tetracálcio
C ₂ S	Silicato de dicálcio
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
a/a	Água/aglomerante
RCD	Resíduos de construção e demolição

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	11
2. 1 OBJETIVO GERAL.....	11
2. 2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 JUSTIFICATIVA	12
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
4. 1 CONSTRUÇÃO CIVIL	14
4. 2 CONCRETO	15
4. 3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	15
4. 4 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO.....	17
4. 4. 1 CIMENTO PORTLAND.....	17
4. 4. 2 AGREGADOS	19
4. 4. 2. 1 AGREGADOS RECICLADOS	22
4.4 3 SUPERPLASTIFICANTE.....	24
4. 4. 4 METACAULIM.....	25
4. 5 DOSAGEM DO CONCRETO.....	27
4. 5. 1 DOSAGEM COM AGREGADOS RECICLADOS	28
5 METODOLOGIA.....	31
5. 1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	31
5. 1. 1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	31
5.1.2 MASSA UNITÁRIA	42
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
7 CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil vem, ao longo dos anos, aperfeiçoando suas técnicas construtivas e como consequência veio o avanço tecnológico que hoje está disseminado pelo mundo. Junto com o avanço nas técnicas também veio o aumento do consumo de recursos naturais e a geração acentuada de resíduos. O avanço do setor passou e passa por várias mudanças, dentre elas pode-se destacar a busca por novos materiais que melhorem as características das edificações e, além disso o aperfeiçoamento das técnicas e materiais já utilizados nas construções. Dentre os avanços conquistados pelo setor pode-se destacar o desenvolvimento da tecnologia do concreto.

Os avanços obtidos na tecnologia do concreto são resultados de estudos da sua estrutura interna e a incorporação de novos materiais na mistura, como adição de minerais e superplastificantes. Com o passar do tempo o concreto tornou-se um material com resistências muito maiores, dando início a produção do concreto de alto desempenho. A utilização de concreto de alto desempenho tem destaque em obras de grande porte, tais como viadutos, grandes edifícios e etc. Com o uso do concreto de alto desempenho é possível seções mais esbeltas e redução no peso da estrutura. O concreto de alto desempenho se caracteriza pela baixa relação água cimento e elevado consumo de material cimentício e necessita de rigor técnico na dosagem, controle da qualidade do cimento e agregados.

O estudo dos materiais que compõem o concreto é fundamental, tanto para concreto convencional como para concretos de alto desempenho, dado que cada componente tem influência sobre as propriedades e características do concreto no estado fresco e endurecido. Atualmente há um aumento na quantidade de estudos em busca de tornar o concreto um material mais sustentável com a inserção de materiais reciclados na mistura. O uso de resíduos como integrante dos materiais constituintes do concreto é crescente em todo o mundo. Nesse contexto, se apresenta o resíduo da indústria de beneficiamento de mármore e granito para utilização como agregado reciclado na produção de concretos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar os componentes do concreto de alto desempenho, bem como as propriedades dos materiais constituintes, por fim avaliar a possibilidade do uso de agregados reciclados como substituição parcial dos agregados miúdos naturais na dosagem do concreto de alto desempenho.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar dados bibliográficos relacionados ao concreto de alto desempenho, apresentar seus componentes, assim como a influência da substituição parcial de agregado miúdo natural por agregado reciclado no comportamento do concreto;
- Realizar a caracterização, por meio de ensaios, de duas amostras agregados miúdos, duas amostras de agregados graúdos e uma amostra de reciclados;
- Analisar se os agregados reciclados de resíduos, oriundos de beneficiamento de mármore e granito, podem ser inseridos como substituição parcial de agregados miúdos na dosagem de concreto de alto desempenho;

3 JUSTIFICATIVA

A construção civil é um ramo de atividade que existe desde os primórdios e, dificilmente deixará de existir considerando que é imprescindível construções para o convívio e as diversas atividades humanas. O setor da construção civil é responsável por usar muitos recursos naturais e gerar um volume alto de resíduos. Sendo assim é fundamental desenvolver medidas que minimizem a utilização de recursos naturais, dentro destas possibilidades pode-se citar o uso de resíduos como material de construção para a fabricação de concretos, argamassas, entre outros usos. Dentro dos componentes de uma construção, o concreto é um material amplamente utilizado. A grande utilização do concreto tem relação com questões culturais e econômicas.

Com o avanço da tecnologia e com necessidade de construções mais esbeltas, há a necessidade de rever as resistências do concreto, além disso a necessidade de produzir cada vez mais o material para atender a demanda. Com isso, o uso de recursos naturais tornou-se cada vez maior e em contrapartida uma geração de resíduos nos canteiros de obra e em indústrias que forneçam matéria prima para o setor.

A indústria de beneficiamento de mármore e granito, por exemplo, tem forte relação com o setor da construção civil.

A quantidade de resíduo que a indústria de rochas ornamentais produz, gira em torno de 1.610.000 toneladas por ano. A utilização desse resíduo para a produção de concreto é uma forma de reduzir os impactos ambientais negativos causados pela sua disposição inadequada no meio ambiente, e ainda de reduzir o consumo de recursos naturais (DEGEN, *et al*, 2013).

Com o grande volume de resíduos gerado e na tentativa de contribuir para um maior desenvolvimento sustentável e um maior aproveitamento de resíduos na construção civil, alguns pesquisadores têm estudado o resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de argamassas (CALMON *et al.*, 1997) e em concretos (GONÇALVES, 2000; GONÇALVES e MOURA, 2002, LISBÔA, 2004).

Quando se trata de concreto de alto desempenho, é fundamental verificar os agregados disponíveis, uma vez que a resistência à compressão do concreto não é, obrigatoriamente, governada pela resistência da pasta da matriz, como ocorre com os concretos convencionais. No concreto de alto desempenho o que define a resistência à compressão é a resistência do agregado ou sua

interface com a pasta. Desta maneira, o agregado deixa de ser apenas um material de enchimento e atua como um fator limitante da resistência do concreto de alto desempenho, que passa a ser controlada pelas características físicas, mecânicas e mineralógicas da rocha utilizada para obter o agregado. Além disso é fundamental desenvolver estudos que auxiliem na tomada de decisão em relação à seleção dos agregados a serem utilizados na produção de concretos (ROHDEN, 2012). Além disso, em busca do desenvolvimento sustentável, é primordial a preocupação com os materiais constituintes do concreto haja vista que tanto os agregados quanto o cimento são materiais não renováveis. Deste modo é fundamental que a produção do concreto seja racional, incorporando o uso de materiais alternativos e buscando produzir estruturas duráveis (ALHADAS, 2008)

Assim o presente trabalho buscou avaliar duas características dos agregados naturais e dos agregados reciclados. Visto que tem por objetivo estudar a substituição parcial dos agregados miúdos por resíduos provenientes do corte e beneficiamento de mármore e granito na dosagem de concreto. A primeira característica é o módulo de finura do agregado e a segunda é a dimensão máxima característica.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Construção civil

A construção civil é uma atividade que faz parte de toda a história da humanidade. O setor tem uma forte relação com desenvolvimento visto que é responsável por produzir infraestrutura necessária para as mais diversas atividades econômicas e sociais. Ao passo que aumentando a população como consequência vem a maior necessidade de construções para o convívio humano. Sua cadeia produtiva, apresenta importantes impactos ambientais em todas as etapas do seu processo: extração de matérias primas, produção de materiais, construção, uso e demolição (SANTOS; LAGO; OLIVEIRA, 2017).

O setor da construção civil é uma das atividades que tem forte contribuição com os impactos nocivos ao meio ambiente, devido as necessidades do setor que está em crescimento constante. Esse crescimento tem relação com déficit habitacional, ampliações, reformas, novas construções para atender o crescimento urbano, desenvolvimento econômico e aumento dos edifícios corporativos, entre outras atividades que ilustram algumas demandas e necessidades (OLIVEIRA, 2015).

Desde os primórdios as construções foram executadas de forma rudimentar, gerando uma grande quantidade de resíduos. Na época das construções das cidades no Império Romano a quantidade de resíduos gerados chamou a atenção dos construtores levando aos primeiros registros de utilização de resíduos nas edificações. Entretanto somente após o final da Segunda Guerra Mundial, que foram registradas as primeiras aplicações significativa do entulho reciclado, reconstrução das cidades Europeias (LEVY, 2006).

Atualmente a construção civil é responsável por gerar cerca de 123.421 toneladas de resíduos por dia, de acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil publicado pela ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, em 2017.

Além da geração e a produção exacerbada de resíduos sólidos, existe ainda os resíduos que tem em sua constituição elementos sintéticos e também perigosos, tanto ao meio ambiente, quanto à saúde humana, devido à incorporação de inovações tecnológicas. O setor também tem destaque para o

uso excessivo de recursos naturais, cerca de 15 a 50% (FERNANDES; AMORIM, 2014).

Neste contexto, utilizar resíduos na indústria da construção civil constitui uma melhoria na gestão ambiental. Atualmente além do uso de resíduos gerados nos canteiros de obras, tornou-se objeto de estudo o uso de resíduos industriais como: os provenientes das indústrias metalúrgicas e termoelétricas. O uso proporciona ao concreto melhor desempenho no estado fresco e endurecido (LISBÔA, 2004).

4. 2 Concreto

Inicialmente, o concreto era produzido com a mistura de basicamente de três materiais: cimento, agregados e água. O cimento era normalmente o cimento Portland. Com o passar do tempo, em busca da melhoria de algumas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, começou a ser inserido pequenas quantidades de aditivos nas misturas. O aperfeiçoamento nas resistências mecânicas do concreto é resultado dos avanços obtidos na tecnologia do concreto nas últimas décadas, destacando-se os estudos da estrutura interna do material e o surgimento de novos materiais como os superplastificantes e adições minerais (NEVILLE, 2016).

De acordo com Pedroso (2009) o concreto é material construtivo amplamente disseminado, algumas estimativas mostram que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, isso corresponde a aproximadamente, um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. No Brasil, o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos por ano.

4. 3 Concreto de alto desempenho

O concreto de alto desempenho, começou a ser desenvolvido por volta dos anos 60. As primeiras percepções sobre os fatores que influenciavam no aumento da resistência à compressão consistiam em diminuir a relação água/aglomerado, isso foi possível pelo uso adequado de redutores de água eficientes. No início dos anos 70, os superplastificantes foram utilizados pela primeira vez em concretos, o objetivo era fluidificar para facilitar o lançamento

sem riscos de segregação e perda da resistência. Por meio de uma seleção criteriosa do cimento Portland e dos superplastificantes era possível diminuir a relação água/aglomerado e com isso alcançar uma resistência à compressão alta, porém não superior a uma resistência de 125 MPa (AİTCIN, 2000).

Aİtcin (2000) apresenta que no final dos anos 70 foi o início do uso de aditivos minerais para a produção de concreto, a sílica ativa. O material foi rapidamente reconhecido e aceito como um aditivo para tornar o concreto trabalhável e com resistência à compressão de 100 MPa a 150 MPa.

Para o concreto de alto desempenho deve ser preparado por meio de uma cuidadosa seleção dos materiais que o compõe. Atualmente a expressão “concreto de alto desempenho” contempla uma larga faixa de resistências. A Tabela 1 apresenta as classes de resistências apresentadas por Aİtcin (2000), o autor aponta que a divisão não é arbitrária e corresponde a valores médios obtidos aos 28 dias.

Tabela 1: Classes diferentes de concreto de alto desempenho

Classe de Concreto de Alto Desempenho	Resistência a Compressão (MPa)
I	50
II	75
III	100
IV	125
V	150

Fonte: AİTCIN (2000, p. 182)

A escolha dos materiais que compõem o concreto de alto desempenho deve ser cuidadosa. A complexidade para a escolha dos materiais é relacionada com a baixa relação água/aglomerante (a/a) para atingir altas resistências, uma vez que à medida que diminui a relação água/aglomerante (a/a) ocorre o aumento da resistência. Ao diminuir o fator água/aglomerante (a/a) diminui-se a trabalhabilidade do concreto. Aİtcin (2000) destaca que, para resistências superiores a 100 MPa essa relação deve ser inferior a 0,30, cita ainda que concretos com a/a de 0,17 atingiram resistência de 73,1 MPa em 24 horas.

De acordo com Cordeiro (2001) a alta resistência à compressão e o alto módulo de elasticidade já nas idades iniciais, baixa segregação, ausência de exsudação são algumas das características que justificam a crescente utilização do concreto de alto desempenho. O autor também apresenta outras vantagens

da utilização de concreto de alto desempenho: a grande durabilidade de estruturas feitas com concreto de alto desempenho; a baixa permeabilidade contribui para o controle de corrosão e carbonatação, além de proteger o concreto de ataques químicos e biológico; desformas mais rápidas; ganho de área útil em virtude das menores seções das peças estruturais; possibilidade de confecção de elementos mais leves e esbeltos. Também apresenta vantagens em termos econômicos visto que houve uma redução de cerca de 12% do custo total de um edifício de 15 andares, ao se empregar concreto de alta resistência ($f_{ck} = 60 \text{ MPa}$) no lugar de um concreto convencional ($f_{ck} = 21 \text{ MPa}$).

4. 4 Composição do concreto

4. 4. 1 Cimento Portland

Cimento, no sentido geral da palavra, pode ser descrito como um material com propriedades adesivas e coesivas. No setor da construção civil, o significado é restrito a materiais aglomerantes utilizados com pedras, areia, tijolos, blocos para alvenaria, etc. As matérias primas utilizadas na produção do cimento consistem em calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Esses compostos interagem entre si durante a produção e formam uma série de produtos Tabela 2, o cimento com composição química e características física diferente pode resultar propriedades diferentes quando hidratado. Atualmente existem diversos tipos de cimentos comerciais disponíveis, e cimentos especiais, que podem ser produzidos para usos específicos (NEVILLE, 2016).

Tabela 2: Compostos principais do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviação
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: NEVILLE (2016)

A princípio o cimento Portland pode ser constituído unicamente de clínquer e de uma substância reguladora de pega. Contudo, ao longo do tempo, outros materiais começaram a ser utilizados em conjunto com o clínquer, dando início aos cimentos com adições Tabela 3.

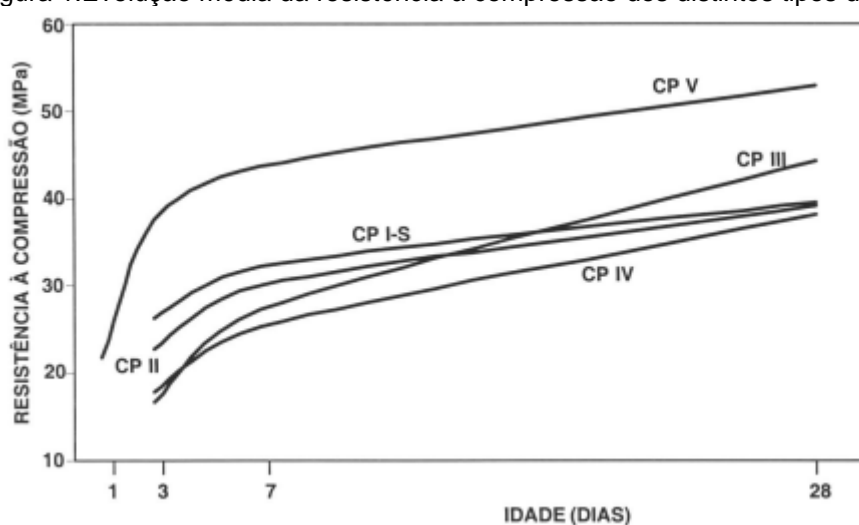
Tabela 3: Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa) Designação

Designação normalizada	Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	95-100		0-5	
	CP I-S	90-94	0	0	6-10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E	51-94	6-34	0	0-15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z	71-94	0	0	0-15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F	75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de alto forno	CP III	25-65	35-65	0	0-10
Cimento Portland pozolânico	CP IV	45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	90-100	0	0	0-10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	75-100	-	0-25
	Não estrutural		50-74	-	26-50

Fonte: ABNT. NBR 16697(2018, p. 5)

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) mediante do Boletim Técnico 106 (1999) apresenta que as resistências alcançadas aos 28 dias superam os limites mínimos estabelecidos pelas normas técnicas da ABNT. Na Figura 1 demonstra-se a evolução média da resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland com base em valores experimentais.

Figura 1: Evolução média da resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, BT, 1999)

A escolha do cimento ideal para produção de concreto de alto desempenho é extremamente importante, uma vez que o material tem influência

na resistência da pasta e na aderência pasta-agregado. Entretanto, para a seleção adequada do cimento, três características devem ser levadas em consideração: finura, composição química e compatibilidade com os aditivos.

Em termos de finura, quanto maior for a superfície específica, em contato com a água, mais rapidamente ocorrerá a hidratação do cimento, aumentando-se sua resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades. Por outro lado, quanto mais fino o cimento, maior a dosagem de superplastificantes necessária para alcançar a mesma trabalhabilidade, uma vez que o desempenho do aditivo é influenciado diretamente pela finura do cimento (SILVA, 2010).

Em relação à composição química para concreto de alto desempenho Mehta e Aïtcin (1990) defendem que é possível a produção com qualquer tipo de cimento Portland, todavia ressaltam a importância daqueles com maior teor de C_3S e C_2S , compostos que contribuem para a resistência do concreto.

De acordo com Mehta (1994) C_3S apresenta rápida hidratação, despreendendo uma quantidade média de calor. Este composto contribui para elevar a resistência inicial da pasta endurecida e aumentar sua resistência final. Já o C_2S , que desprende uma quantidade pequena de calor durante sua lenta hidratação, também é responsável pelo aumento de resistência nas idades avançadas e produz um volume menor de $Ca(OH)_2$, em comparação com o C_3S . O C_4AF também se hidrata rapidamente, mas exerce pouca influência sobre a resistência mecânica da pasta.

Para a escolha adequada do cimento Portland utilizado na produção do concreto de alto desempenho, exige-se conhecimento técnico visto que conforme o tipo de cimento adotado, há influência significativa na resistência, principalmente nas primeiras idades.

4. 4. 2 Agregados

Considerando uma amostra de concreto, cerca de 25% do volume de é composto pelos agregados, ou seja, é de extrema importância que seja levado em conta a qualidade desse material. Inicialmente, os agregados eram vistos como materiais inertes, dispersos na pasta de cimento, sendo utilizados basicamente por razões econômicas, em termos econômicos o agregado é mais acessível que o cimento. Porém com o tempo essa concepção foi mudada visto que o agregado é um material de construção que possui propriedades físicas, térmicas e, em algumas vezes químicas que tem forte influência sobre o desempenho do concreto. Além das propriedades para um concreto de boa

qualidade é importante que as dimensões dos agregados tenham variação, ou seja, deve ser incorporado partículas com diferentes dimensões (NEVILLE, 2016, p. 111).

Os agregados são divididos em dois grupos: agregados graúdos e agregados miúdos. O agregado graúdo refere-se as partículas maiores que 4,8 mm, ou seja, as partículas cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Na Tabela 4 apresenta-se os limites granulométricos estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2009), com as respectivas graduações dos agregados graúdos.

Tabela 4: Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.

		Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)												
		75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	31,5 mm	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	6,3 mm	4,75 mm	2,36 mm	
Zona granulométrica (d/D ⁱ)	Porcentagem, em massa, retida acumulada	4,75/12,5	-	-	-	-	-	-	-	0-5	2-15	40-65	80-100	95-100
		9,5/25	-	-	-	-	-	0-5	2-15	40-65	80-100	92-100	95-100	-
		19/31,5	-	-	-	-	0-5	5-25	65-95	92-100	95-100	-	-	-
		25/50	-	-	0-5	5-30	75-100	87-100	95-100	-	-	-	-	-
		37,5/75	0-5	5-30	75-100	90-100	95-100	-	-	-	-	-	-	-
		Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo												

Fonte: ABNT. NBR 7211(2009, p. 7)

A resistência dos agregados, o tamanho, a forma e a textura da superfície e a granulometria influenciam nas propriedades do concreto, dentre estas a resistência, a escolha do agregado graúdo é a mais complexa, visto que as propriedades físicas, químicas e mineralógicas afetam, consideravelmente, as propriedades mecânicas do concreto, tais como resistência e durabilidade. Os agregados graúdos menores são mais resistentes que os agregados maiores, isso acontece porque durante o processo de britagem, as rochas quebram nas zonas fracas. Desta forma, quanto menor o agregado graúdo utilizado menor será a incidência de zonas fracas (SILVA, 2018).

Os agregados miúdos, frequentemente denominados areia possuem dimensão inferior a 4 mm (NEVILLE, 2016, p. 111). A Associação Brasileira de Normas Técnicas classifica os agregados miúdo em zonas, de acordo com sua composição granulométrica Tabela 5.

Tabela 5: 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 ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600µm	15	35	55	70
300µm	50	65	85	95
150µm	85	90	95	100

O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT. NBR 7211(2009, p. 5)

Uma das premissas para a escolha do agregado miúdo baseia-se na demanda de água de mistura. Um agregado miúdo de partículas arredondadas e textura lisa requer menor quantidade de água sendo assim é indicado para o concreto de alto desempenho. É fundamental após a escolha apropriada do agregado miúdo, que haja um minucioso controle de qualidade, pois pequenas variações no teor de umidade ou granulometria podem acarretar mudanças significativas nas propriedades do concreto fresco e endurecido (CORDEIRO, 2001).

De acordo com Aïtcin (2000) para um concreto de alto desempenho, sempre que possível, o agregado miúdo selecionado deve corresponder a um modelo de finura de 2,7 ou 3,0.

O uso de uma areia tão grossa é apoiado pelo fato de que os traços de alta resistência são ricos em partículas finas devido ao seu alto teor de cimento e de materiais cimentícios, de tal forma que não é necessário usar uma areia fina do ponto de vista da trabalhabilidade e da segregação. Além disso, o uso de areia grossa leva a pequenos decréscimos na quantidade da água de mistura necessária para uma dada trabalhabilidade, o que é vantajoso tanto do ponto de vista da resistência, como do ponto de vista econômico AÏTCIN (2000, p. 225).

De acordo com ACI 363R-10 para escolha do agregado miúdo deve ser levando em consideração a demanda de água e o seu empacotamento físico, sendo preferíveis partículas arredondadas e lisas, em razão de que essas necessitam de menor quantidade de água de amassamento. O módulo de finura adequado para o concreto de alto desempenho é de aproximadamente 3,0.

4. 4. 2. 1 Agregados reciclados

A ABNT NBR 1004 (2004) define resíduos sólidos ou semissólidos como aqueles, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Segundo a norma os resíduos, são classificados em: resíduos classe I – perigosos; resíduos classe II – não perigosos; resíduos classe II A– não inertes; resíduos classe II B – Inertes. Dentre os resíduos inertes estão incluídos os gerados pela construção civil (areia, demolição, pedras, etc.).

As diretrizes, definições, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil são estabelecidos na Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) de 2002. Esta Resolução define o agregado reciclado como o material granular gerado através do beneficiamento dos resíduos da construção ou demolição, que atende as normas técnicas, podendo ser aplicado em obras de edificação, infraestrutura, em aterros sanitários e outras obras de engenharia.

As vantagens de utilizar o material reciclado como agregado para o concreto são muitas, como: o reaproveitamento dos componentes minerais do entulho tais como os tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, não havendo a necessidade de separação. Ocorrerá também uma economia significativa de energia no processo de moagem, pois misturado ao concreto, o material pode se apresentar em granulometrias graúdas e podem ocorrer melhorias no desempenho do concreto em relação aos agregados convencionais (FERNANDES, 2015).

Tanto no Brasil como em outros países, a maior parte do mercado de agregados reciclados é voltada para o emprego em concreto convencional e em argamassas. No Brasil, se todos os resíduos da construção civil fossem destinados à produção de elementos à base de cimento, ocupariam apenas cerca de 20% do mercado de agregados naturais. Sabe-se que o emprego dos agregados de resíduos da construção civil reciclados em concreto é viável, no entanto, as normas para uso de desse material em concretos não são facilmente aplicáveis (ARAÚJO *et al*, 2016).

Quanto ao uso de agregados gerados de resíduos de rochas para revestimento na construção civil ou na fabricação de concreto, ainda há pouco material publicado no Brasil. O agregado produzido a partir de resíduos marmorarias apresenta características tecnológicas adequadas para uso na produção de concreto e consumo de cimento semelhante ao de agregados

convencionais. A experimentação revelou que é possível o aproveitamento total do agregado gerado pelo resíduo. Isto é evidenciado pelas resistências mecânicas semelhantes, entre o concreto produzido com o agregado convencional e com o agregado reciclado (QUEIROZ; FRASCÁ, 2008).

Valentina, Faganello e Semptikovski (2009) apresentaram em seu estudo que concreto de alto desempenho com substituição parcial de 10% e 15% do agregado miúdo por agregado de resíduos de mármore e granito, com a idade de 7 dias, os valores médios de resistência à compressão obtidos apresentaram melhor desempenho do que os concretos de referência, atingindo valores acima de 50 MPA. Também demonstraram que misturas de concreto com a incorporação do subproduto do corte de mármore e granito apresentaram no estado fresco maior coesão e consistência em consequência do aumento da quantidade de finos.

Gameiro et al. (2014), avaliaram a durabilidade de concretos com a substituição do agregado miúdo por pó de marmoraria, nos teores de 20%, 50% e 100%. Concluíram que a trabalhabilidade dos concretos reduz conforme se aumenta o teor de substituição de agregado convencional pelo resíduo. Quanto à durabilidade dos concretos observou-se que a proporção de 20% de substituição se mostrou favorável quanto à absorção de água por capilaridade. Todos os teores de substituição também foram vantajosos quanto à absorção de água por imersão.

A pesquisa desenvolvida por Sardinha, Brito e Rodrigues (2016) mostrou que as características de durabilidade do concreto pioram à proporção que o teor de cimento aumenta e o teor de resíduo de mármore aumenta. Porém, para as taxas de incorporação de 5% e 10%, essas perdas foram insignificantes.

Levy (2006) destaca que a alternativa de produzir concreto com resíduos é uma solução que vem sendo largamente pesquisada. Estudos mostram que o uso de agregado reciclado no concreto, em proporções convenientemente dosadas, não provoca corrosão da armadura, desta forma o uso de agregados reciclados não provoca a redução de durabilidade quando comparado ao concreto produzido, exclusivamente, com agregados naturais. Substituição de agregados naturais por agregados reciclados em teores de até 30% não apresentam alterações significativas na resistência à compressão (ARAÚJO *et al*, 2016).

4.4 3 Superplastificante

O que proporcionou o desenvolvimento das resistências do concreto podendo atingir valores altos foi a descoberta dos superplastificantes, também conhecidos como superfluidificantes ou aditivos redutores de água de alta eficiência. A ABNT NBR 11768 (2011) é responsável por regulamentar a adição de superplastificantes ao concreto no Brasil.

Os aditivos são definidos pela ABNT NBR 12655 (2015) como materiais inseridos na composição do concreto durante o processo de mistura em uma quantidade não inferior aos 5% sobre a massa do cimento contido no concreto, com o objetivo de modificar as propriedades da mistura no estado fresco e/ou no estado endurecido. De acordo com Neville (2016) o que leva o crescimento do uso de aditivos é devido a capacidade que o material tem de proporcionar melhorias nas propriedades do concreto.

A eficácia do superplastificante no concreto depende do tipo escolhido, uma vez que cada tipo reage de uma forma específica em contato com o cimento. Mesmo que o cimento e superplastificante estejam de acordo com a norma, eles podem ter incompatibilidade nas reações (AÏTCIN, 1998).

Os aditivos recomendados para Concreto de alto desempenho são os superplastificantes, de terceira geração. Esses superplastificantes no estado fresco reduzem a taxa de redução de água em até 30%, aumentam a coesão e reduzem a segregação, aumentam a trabalhabilidade do concreto. O aumento da resistência à compressão do concreto com a redução da relação água/cimento permite reduzir o consumo de cimento do concreto e também utilizar materiais alternativos, como agregados reciclados e novas adições minerais atribuindo a este material um significativo papel em relação à sustentabilidade e economia na produção dos concretos (BASTOS, 2016).

A utilização dos superplastificantes é crescente devido a maior preocupação com sustentabilidade, especialmente com o ponto de vista na durabilidade. Dado que para fazer um concreto durável aos agentes e ambientes agressivos é fundamental reduzir a porosidade por meio da redução de água, pois com uma menor quantidade de água no sistema podemos avançar um concreto com menor permeabilidade de água e assim reduzir expressivamente a migração por cloretos e a carbonatação do concreto (MONFARDINI, 2014).

4. 4. 4 Metacaulim

Os aditivos minerais são materiais siliciosos mais finos que os cimentos utilizados na composição do concreto e tem a finalidade de diminuir a porosidade do mesmo, proporcionando-lhe um melhor desempenho tanto no estado fresco como no endurecido (ARAÚJO *et al.* 2003)

A ABNT NBR 12653 (2015) define os materiais pozolânico como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e formam compostos com propriedades aglomerantes. Além das vantagens técnicas, as pozolanas possibilitam concretos com menor custo, devido à redução do grau de moagem ou pela possibilidade de substituição parcial do cimento. Os aditivos minerais podem ser classificados de acordo a função físico-química, as adições minerais em três grupos: material pozolânico, material cimentante e fíler.

O metacaulim é uma pozolana silico aluminosa derivada normalmente da calcinação, entre 600 e 900 °C, de alguns tipos de argilas, como as argilas caulíníticas e os caulins.

O Metacaulim é uma pozolana de alta reatividade. A interação física e química com o cimento Portland modifica a reologia dos compósitos concreto, argamassa e pasta, no estado fresco, e confere propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido.

A elevada área superficial melhora aspectos reológicos através da otimização da distribuição granulométrica da pasta, contribuindo na retenção de água, aumento da coesão, redução da exsudação e segregação, facilitando o acabamento final.

O metacaulim também acelera o processo de hidratação do cimento Portland, atua como fíler e reage com o Ca(OH)_2 proveniente da hidratação do cimento Portland, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Essas contribuições conferem aos compósitos concreto, argamassa e pasta propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico, quando comparadas às propriedades desses compósitos sem a sua presença. (ABNT NBR 15894-1, 2010).

Saad *et al.* (1983) destaca a grande utilização da pozolana metacaulinita nas décadas de 60 e 70 na construção de algumas grandes barragens no Brasil, substituindo cerca de 30%, em volume, de cimento para concretos massa e cerca de 20% para concretos estruturais.

Os avanços na tecnologia do concreto mostram que o uso de pozolanas, como o metacaulim, é essencial para a produção de concretos com excelentes

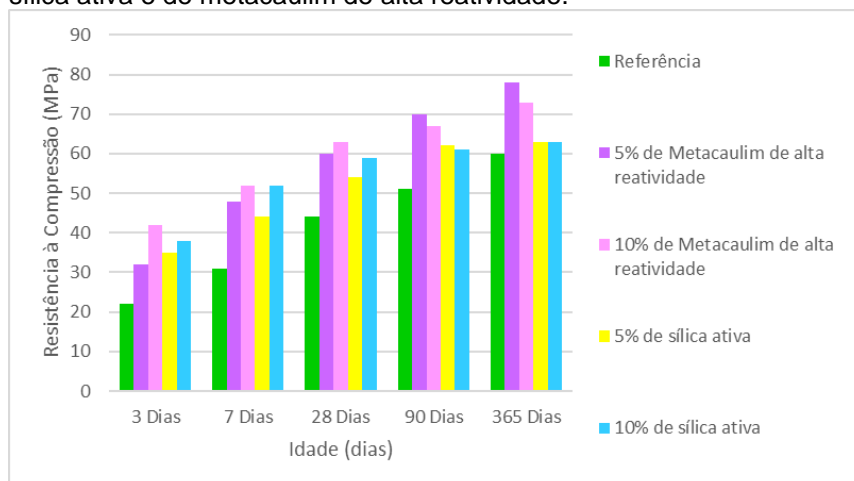
propriedades físicas. Estudos mostram que devido a viabilidade econômica o material se tornou bastante atrativo, isso ocorre porque os custos para a obtenção do de pozolanas é menor em relação ao cimento Portland.

Comparando os impactos ambientais gerados na produção do cimento e do metacaulim, os impactos gerados na fabricação do metacaulim são de menores proporções. O processo de produção tem menor potencial de poluição que o cimento. Comparando as temperaturas de queima na produção de metacaulim (de 600 °C a 900 °C) e cimento (1300 °C), nota-se que a diferença entre os valores proporciona ao metacaulim uma menor liberação de CO₂, por necessitar menor temperatura de queima (VICENTINI, *et al*, 2016). Além disso merece destaque o fato de que o volume de subprodutos pozolânicos gerados no mundo pelos fornos das usinas termoelétricas, metalúrgicas e siderúrgicas é altíssimo. Desta forma desenvolver técnicas que possam utilizar esses subprodutos é de grande relevância para um desenvolvimento sustentável. A construção civil pode ser uma forte aliada para o uso desses materiais na produção de concretos (OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Barata e Dal Molin (2002), o aumento da resistência à compressão dos concretos produzidos com metacaulinita em relação aos concretos de referência é devido à extrema finura desta adição mineral e da presença de fase pozolanicamente ativa.

O estudo feito Caldarone *et al.* (1994) consistiu em fazer comparações entre cinco tipos de misturas: sem adição, com 5% de metacaulim de alta reatividade, com 10% de metacaulim de alta reatividade, com 5 % de sílica ativa e com 10% de sílica ativa, todos com a mesma relação água/cimento. Por meio da Figura 2 é possível perceber que com o concreto de referência, houve em todas as idades uma melhoria da resistência à compressão do concreto com metacaulim, tanto para o teor de 5% quanto para o teor de 10%.

Figura 2: Comportamento da resistência à compressão do concreto com diferentes teores de sílica ativa e de metacaulim de alta reatividade.



Fonte: Adaptado de Caldarone et al. (1994)

Santos (2012) afirma que no Brasil ainda existem poucas empresas destinadas à extração do caulim e à fabricação do metacaulim, entretanto mesmo assim o mercado brasileiro está entre os cinco maiores do mundo para o metacaulim. O autor ainda estima que grande parte das empresas relacionadas à produção de cimento e concreto no país utilizam o material pozolânico.

Mesmo com todas as melhorias provenientes do uso da metacaulinita em concretos e argamassas, sua utilização não é tão frequente quando comparada com outras pozolanas, como sílica ativa e cinza volante. (CORDEIRO, 2001). Isso se deve ao alto custo relativo de processamento deste aditivo (PALOMO *et al.* 1999).

4. 5 Dosagem do concreto

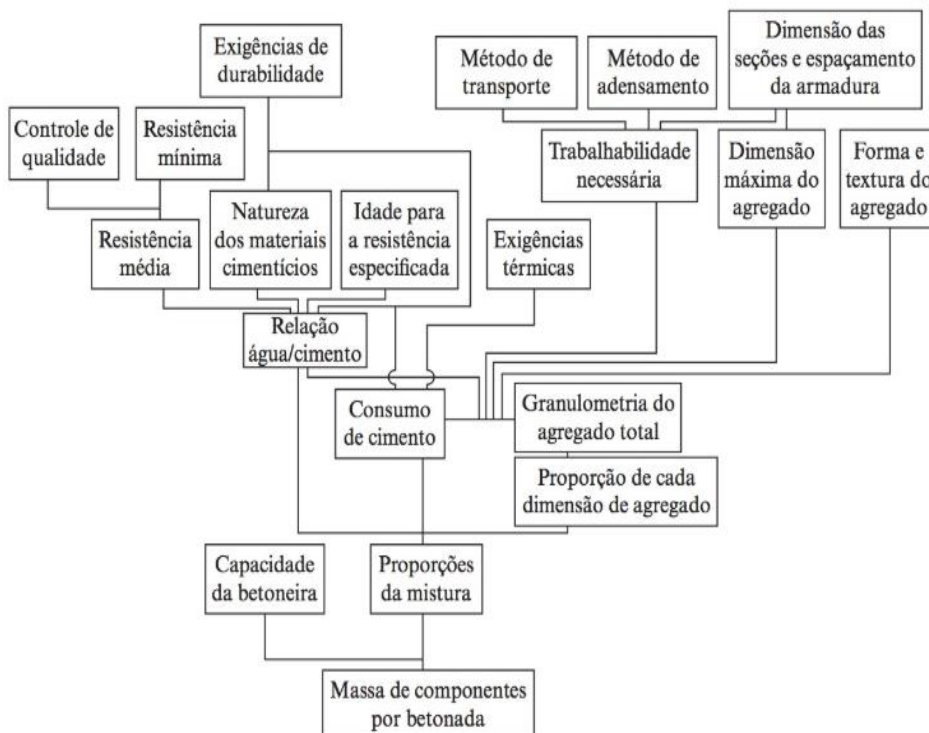
Segundo Mehta e Monteiro (1994), a escolha dos materiais apropriados e os métodos de dosagem são fundamentais para a produção de concretos que atendam às especificações de resistência e durabilidade das estruturas, como o menor custo possível.

Aïtcin (2000) destaca que na seleção de materiais para um concreto de alto desempenho, algumas escolhas são mais críticas do que outras; por essa razão a escolha do cimento Portland deve ser a primeira definição, mesmo que sejam utilizados outros materiais em combinação com o cimento, como aditivos minerais. A escolha do superplastificantes é muito significativa, uma vez que a experiência mostra que a combinação com o cimento deve ser otimizada, mas

em comparação com os outros materiais a escolha do superplastificantes é a menos crítica.

Para Neville (2016) os fatores básicos a serem considerados na dosagem do concreto estão representados na Figura 3 . A sequência de decisões também é direcionada para determinar a quantidade de cada material constituinte.

Figura 3:Fatores básicos do processo de dosagem.



Fonte: Neville (2016)

O autor comenta que a trabalhabilidade pode ser controlada por um teor adequado de superplastificantes e o teor de água pode ser definido a partir da relação água/cimento para a obtenção da resistência desejada.

A quantidade de água em kg/m³ do concreto é determinada diretamente a partir da trabalhabilidade da mistura (em função da dimensão máxima do agregado), em vez de ser obtida indiretamente a partir da relação água/cimento e do consumo de cimento (NEVILLE, 2016).

Diversos métodos têm sido propostos e utilizados na dosagem e na quantificação do concreto de alto desempenho.

4. 5. 1 Dosagem com agregados reciclados

De acordo Albuquerque e Gonçalves (2010) concreto de alto desempenho com substituição parcial e total de agregados naturais miúdos pode alcançar a resistência almejada. Na Tabela 6, apresenta-se a dosagem de materiais para o concreto de alto desempenho com agregado reciclado. Nesta dosagem todas as misturas foram feitas com o acréscimo de 8% de aditivo mineral e 0,7% de aditivo plastificante, em relação ao cimento.

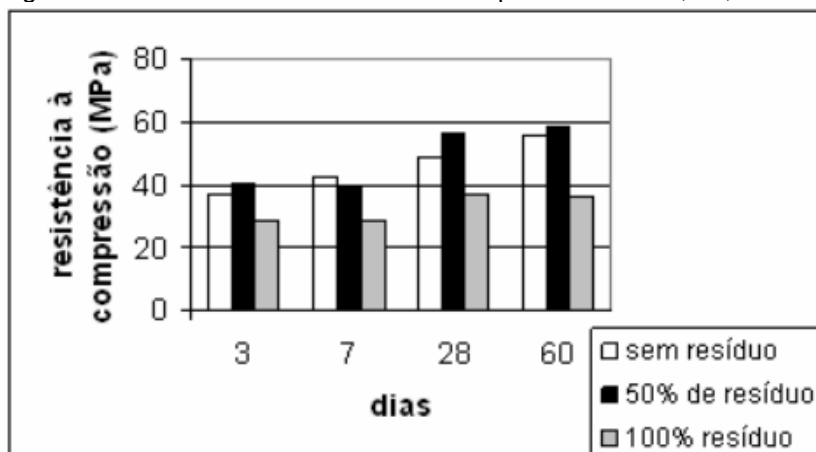
Tabela 6: Traço e misturas do concreto de alto desempenho com agregado reciclado

Mistura A (CAD “Padrão”)	%
Traço (em peso): 1: 2,5: 2,0	-
Agregado miúdo: Areia Grossa	100
Agregado miúdo: Resíduo de Concreto	0
Mistura B (CAD com 50% de resíduo)	-
Traço (em peso): 1: 2,5: 2,0	-
Agregado miúdo: Areia Grossa	50
Agregado miúdo: Resíduo de Concreto	50
Traço C (CAD com 100% de resíduo)	-
Traço (em peso): 1: 2,5: 2,0	-
Agregado miúdo: Areia Grossa	0
Agregado miúdo: Resíduo de Concreto	100

Fonte: Albuquerque e Gonçalves (2010)

Na Figura 4 são apresentados os resultados de resistência à compressão, obtidos nos ensaios realizados. Nota-se que inserir o agregado reciclado (resíduo) em porcentagens de 50% torna a resistência superior ao concreto sem resíduo. Entretanto substituir o agregado natural totalmente por agregado reciclado ocorre um decréscimo da resistência.

Figura 4: Resultados de resistência à compressão aos 03, 07, 28 e 60 dias



Fonte: Albuquerque e Gonçalves (2010)

Albuquerque e Gonçalves (2010) ainda apresenta os resultados de resistência à flexão satisfatórios quando substituem parcialmente os agregados miúdos.

Incorporação do resíduo substituindo 50% de areia exerceu uma alteração bastante pequena na relação água/ cimento das composições estudadas, havendo necessidade de uma maior quantidade de água para se obter um abatimento igual ao obtido para o concreto sem adição de resíduo. Porém não houve diminuição de resistência; para o CAD com 50% de resíduo (ALBUQUERQUE; GONÇALVES, 2010).

5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para elaboração deste trabalho, primeiramente, consistiu em pesquisa bibliográfica afim estudar o concreto de alto desempenho com o objetivo de definir os materiais constituintes e as características dos mesmos, esperadas, para a produção de concreto de alto desempenho.

Dos materiais constituintes da composição do concreto de alto desempenho foi realizado o ensaio de caracterização dos agregados convencionais e do resíduo de corte e beneficiamento de mármore e granito. Sendo o segundo material o agregado reciclado para a substituição parcial dos agregados miúdos.

Após a realização dos ensaios de caracterização foi feito um estudo com base nas características determinadas se os mesmos são indicados para a serem utilizados em concreto de alto desempenho.

Os agregados miúdos e graúdos foram obtidos por meio de doação na empresa Concretos Itaipu, situada na cidade de Campo Mourão-PR. Os agregados reciclados foram obtidos por meio de doação em uma indústria de beneficiamento de mármore e granito situada na cidade de Campo Mourão-PR.

5. 1 Seleção e caracterização dos materiais

5. 1. 1 Análise granulométrica

A fim de classificar os agregados, realizou-se ensaio granulométrico nos agregados miúdos e graúdos. Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais da UTFPR – Campus Campo Mourão e seguindo os procedimentos determinados na ABNT NBR NM 248 (2003). A preparação da amostra para ensaio seguiu as orientações constantes na ABNT NBR NM 26 (2009) e ABNT NBR NM 27 (2001). Ambos os agregados foram secos em estufa por um período de 24 horas.

Analisando a composição granulométrica das amostras de agregados, foi possível determinar a dimensão máxima característica (D.M.C) e o módulo de finura das amostras ensaiadas.

A Dimensão Máxima Característica (D.M.C) dos agregados corresponde à abertura nominal, em mm, da malha da peneira da série normal ou

intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

O módulo de finura corresponde a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras série normal, dividida por 100. O módulo de finura é uma grandeza adimensional e deve ser apresentado com aproximação de 0,01.

5.1.1.1 Procedimento de ensaio - agregados miúdos

Os agregados utilizados foram obtidos na empresa Concretos Itaipu, situada na cidade de Campo Mourão. O ensaio foi realizado duas amostras de agregados miúdos: areia fina e areia grossa finos.

Para o ensaio pesou-se duas amostras areia seca em estufa com o auxílio de uma balança com capacidade mínima de 20 g e sensibilidade de 1 g. A balança foi tarada com o recipiente utilizado para garantir precisão nos dados obtidos. A seguir o agregado miúdo foi adicionado ao peneirador automático o qual já estava com as peneiras da série normal apropriadamente colocadas (Figura 5).

Figura 5: Peneirador automático



Fonte: Autoria própria (2020)

A amostra foi peneirada de modo que seus grãos fossem separados e classificados em diferentes tamanhos (Figura 6). O peneiramento foi contínuo. O material retido em cada peneira, além do fundo, foi separado e pesado.

Figura 6: Amostra de agregado separadas por peneiramento



Fonte: Autoria própria (2020)

Por meio do ensaio das amostras foram obtidos os dados que constam na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7: Análise granulométrica, amostra de areia fina

Peneira (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida		Porcentagem retida acumulada	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
4,8	0	0,14	0,00%	0,03%	0,00%	0,03%
2,4	0,21	0,61	0,04%	0,12%	0,04%	0,15%
1,2	1,38	1,44	0,28%	0,29%	0,32%	0,44%
0,6	5,71	5,55	1,14%	1,11%	1,46%	1,55%
0,3	143,03	148,13	28,61%	29,60%	30,07%	31,15%
0,15	308,88	304,04	61,77%	60,76%	91,84%	91,91%
Fundo	40,8	40,46	8,16%	8,09%	100,00%	100,00%
Total	500,01	500,37	100,00%	100,00%	M1	500,01
Módulo de finura			1,24		M2	500,37

Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 8: Análise granulométrica, amostra de areia grossa.

Peneira (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida		Porcentagem retida acumulada	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
4,8	13,51	6,39	2,70%	1,28%	2,70%	1,28%
2,4	42,93	34,92	8,57%	6,97%	11,26%	8,25%
1,2	119,77	110,67	23,90%	22,09%	35,17%	30,34%
0,6	201,99	213,97	40,31%	42,71%	75,48%	73,05%
0,3	100,17	111,4	19,99%	22,24%	95,47%	95,29%
0,15	17,76	19,19	3,54%	3,83%	99,02%	99,12%
Fundo	4,92	4,39	0,98%	0,88%	100,00%	100,00%
Total	501,05	500,93	100,00%	100,00%	M1	501,05
Módulo de finura		3,13				
				M2	500,93	

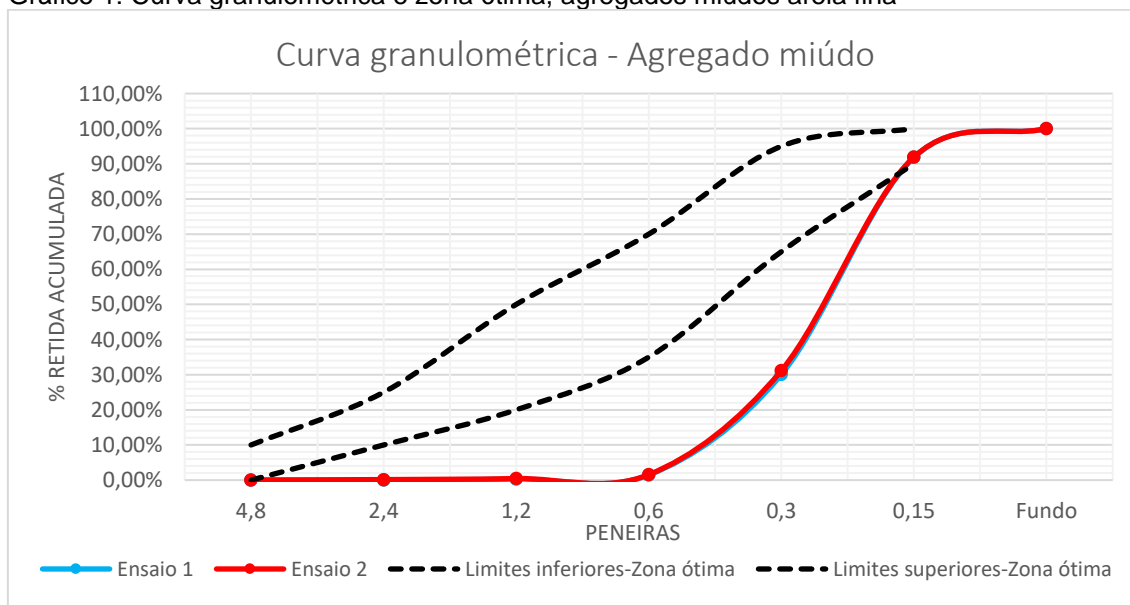
Fonte: Autoria própria (2020)

Analisando a composição granulométrica das amostras de agregados ensaiadas, foi determinado módulo de finura. A amostra de areia com granulometria fina o módulo de finura obtido foi de 1,24 e, a amostra de areia grossa o módulo de finura obtido foi de 3,13.

Para o ensaio com areia muito fina a dimensão máxima característica obtida foi de 0,60 mm. E, para a amostra de areia grossa a dimensão máxima característica obtida foi de 4,80 mm.

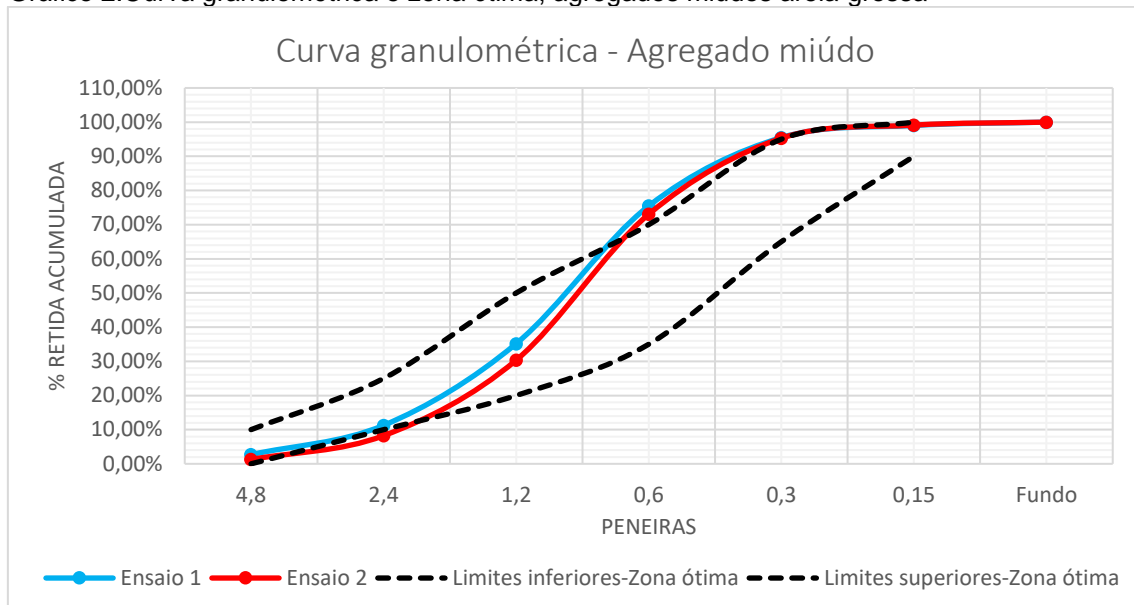
A curva granulométrica de cada amostra ensaiada é apresentada nos Gráfico 1 e Gráfico 2. A distribuição granulométrica, deve atender os limites inferiores e superiores estabelecidos pela ABNT NBR 7211(2009).

Gráfico 1: Curva granulométrica e zona ótima, agregados miúdos areia fina



Fonte: Autoria própria (2020)

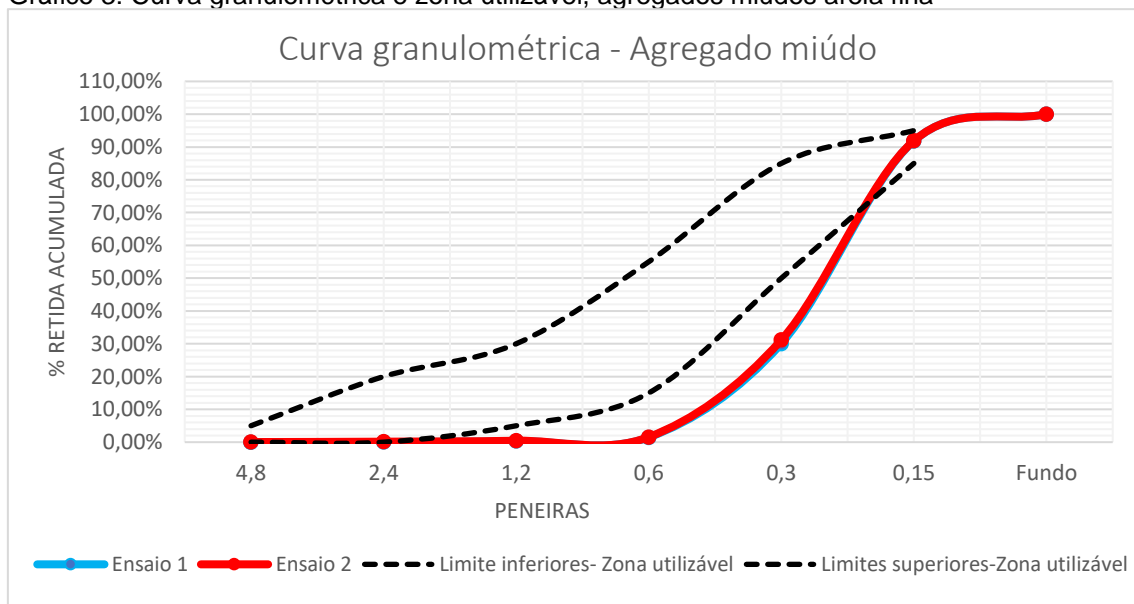
Gráfico 2: Curva granulométrica e zona ótima, agregados miúdos areia grossa



Fonte: Autoria própria (2020)

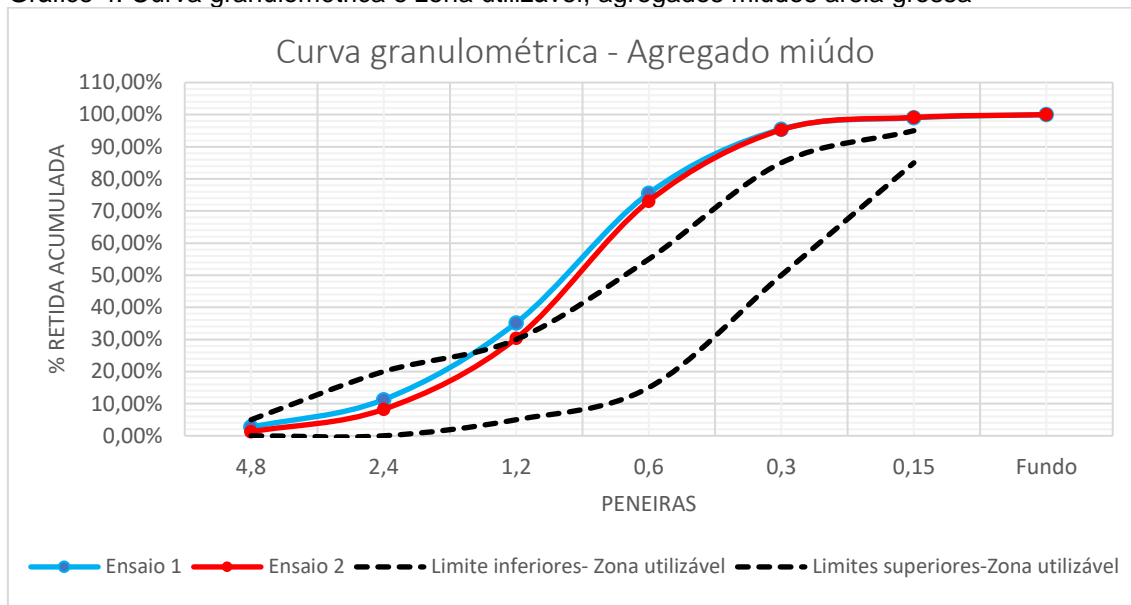
Através da análise dos Gráfico 1 e Gráfico 2, os quais demonstram a curva granulométrica das amostras de dois tipos de areias e os limites inferiores (zona ótima) e superiores (zona ótima) indicados pela ABNT NBR 7211 (2009), a curva granulométrica da amostra de areia grossa mantém alguns pontos dentro dos limites indicados pela norma. A amostras de areia fina contém todos os pontos fora dos limites estabelecidos pela norma.

Gráfico 3: Curva granulométrica e zona utilizável, agregados miúdos areia fina



Fonte: Autoria própria (2020)

Gráfico 4: Curva granulométrica e zona utilizável, agregados miúdos areia grossa



Fonte: Autoria própria (2020)

Através da análise dos Gráfico 3 e Gráfico 4, os quais demonstram a curva granulométrica das amostras de dois tipos de areias e os limites inferiores (zona utilizável) e superiores (zona utilizável) indicados pela ABNT NBR 7211 (2009), a curva granulométrica da amostra de areia grossa mantém alguns pontos dentro dos limites indicados pela norma. A amostras de areia fina contêm todos os pontos fora dos limites estabelecidos pela norma.

5.1.1.2 Procedimento de ensaio - Agregados reciclados

O resíduo utilizado é oriundo do beneficiamento de rochas ornamentais (mármore, granito, etc.). O material foi disponibilizado por uma empresa de marmoraria localizada na cidade de Campo Mourão, Paraná. A coleta foi realizada na empresa com auxílio e autorização do proprietário.

Durante o processo de corte das rochas são gerados resíduos que ficam depositados em uma caixa de decantação (Figura 7).

Figura 7: Caixa de decantação dos resíduos gerados



Fonte: Autoria própria (2020)

Após a retirada da caixa de decantação o material inicialmente apresentou uma consistência pastosa, similar a uma lama (Figura 8). O mesmo foi mantido por um período de \pm 24 horas em temperatura ambiente. Posteriormente foi inserido em uma forma metálica e mantido em estufa por um período de 48 horas para secagem. Após foi realizado o processo de destorroamento da amostra (Figura 9).

Figura 8: Resíduo coletado na forma de lama



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 9: Amostra de resíduo seca



Fonte: Autoria própria (2020)

A análise granulométrica da amostra foi realizada de acordo com as orientações constantes na ABNT NBR NM 248 (2003).

Para o ensaio pesou-se 801,66 gramas de amostra de agregado com o auxílio de uma balança com capacidade mínima de 20 g e sensibilidade de 1 g. Com um quarteador de amostra ela foi dividida em 2 porções. A balança foi tarada com o recipiente utilizado para garantir precisão nos dados obtidos, foram obtidas a massa 1 (referente ao ensaio 1) e massa 2. A seguir os agregados reciclados foram adicionados ao peneirador automático o qual já estava com as peneiras da série normal apropriadamente colocadas.

A amostra foi peneirada de modo que seus grãos fossem separados e classificados em diferentes tamanhos. O peneiramento foi contínuo, e realizado duas vezes. O material retido em cada peneira, além do fundo, foi separado e pesado (Tabela 9).

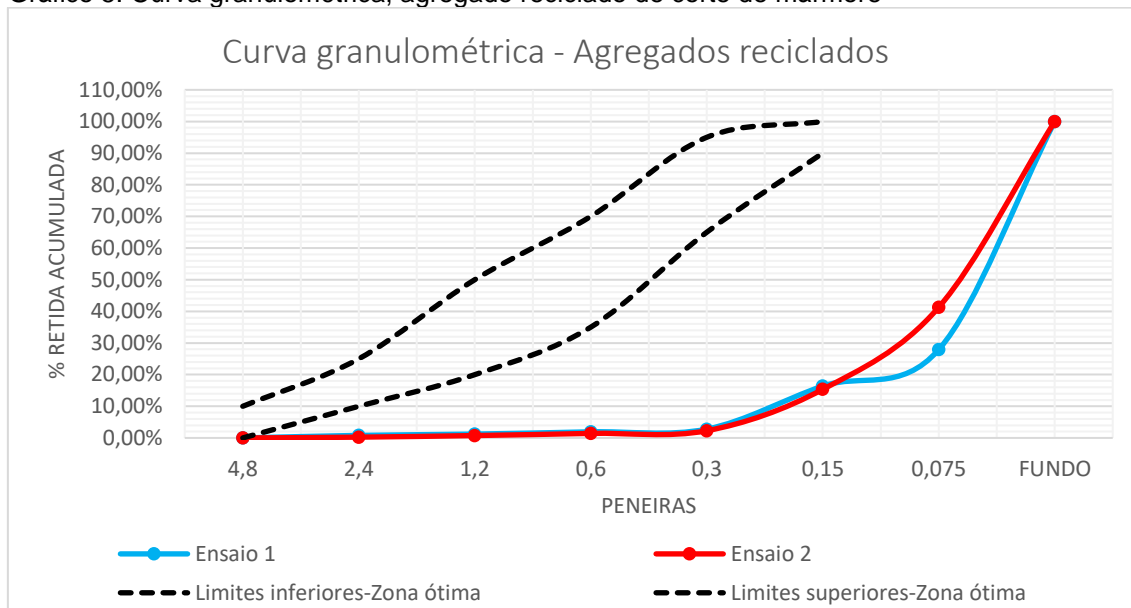
Tabela 9: Análise granulométrica, agregado reciclado.

Peneira (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida		Porcentagem retida acumulada	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
4,8	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2,4	3,24	1	0,81%	0,25%	0,81%	0,25%
1,2	1,66	2,04	0,42%	0,51%	1,23%	0,75%
0,6	2,84	2,76	0,71%	0,68%	1,94%	1,44%
0,3	3,36	3,38	0,84%	0,84%	2,78%	2,28%
0,15	54,24	52,68	13,60%	13,07%	16,39%	15,35%
0,075	45,94	104,52	11,52%	25,94%	27,91%	41,29%
FUNDO	287,4	236,6	72,09%	58,71%	100,00%	100,00%
Total	398,68	402,98	100,00%	100,00%	M1	398,68
Módulo de finura		0,56		M2		402,98

Fonte: Autoria própria (2020)

O módulo de finura obtido da amostra de agregados reciclados foi de 0,56. Nota-se que uma porcentagem superior a 50% da amostra passou pela peneira de 0,075 mm, então isso o caracteriza como material de granulometria muito fina (ABNT NBR 7211, 2009). A dimensão máxima característica para o agregado é de 0,30 mm.

Gráfico 5: Curva granulométrica, agregado reciclado de corte de mármore



Fonte: Autoria própria (2020)

Mediante a análise do Gráfico 5, o qual demonstra a curva granulométrica da amostra de agregado reciclado e os limites inferiores (zona ótima) e superiores (zona ótima) indicados pela ABNT NBR 7211 (2009), a curva granulométrica da amostra mantém todos pontos fora dos limites indicados pela norma.

5.1.1.3 Procedimento de ensaio - Agregados graúdos

Os agregados utilizados foram obtidos, por meio de doação, no estabelecimento Concretos Itaipu, situada na cidade e Campo Mourão. Para o ensaio pesou-se amostra suficiente para repetir o ensaio duas vezes. Foram pesadas amostras para dois tipos de agregados graúdos (Figura 10). Com um quarteador cada amostra foi dividida em 2 porções. A balança foi tarada com o recipiente utilizado para garantir precisão nos dados obtidos, foram obtidas a massa 1 (referente ao ensaio 1) e massa 2 (referente ao ensaio 2).

Figura 10: Agregados graúdos, brita 0 e brita 1.

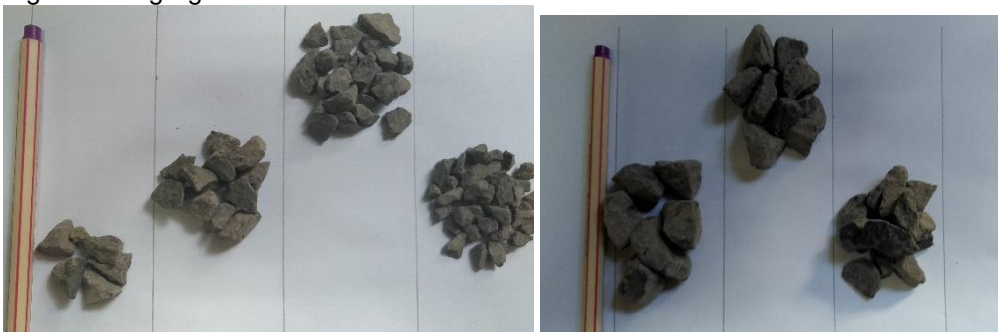


Fonte: Autoria própria (2020)

A seguir os agregados foram adicionados ao peneirador automático o qual já estava com as peneiras da série normal apropriadamente colocadas.

A amostra foi peneirada de modo que seus grãos fossem separados e classificados em diferentes tamanhos. O peneiramento foi contínuo, e realizado duas vezes. O material retido em cada peneira, além do fundo, foi separado e pesado (Figura 11).

Figura 11: Agregados



Fonte: Autoria própria (2020)

Primeiro o ensaio foi realizado para amostra de brita com granulometria mais fina (Tabela 10). Posteriormente foi realizado com a amostra mais grossa de agregados (Tabela 11).

Tabela 10: Análise granulométrica, agregado graúdo brita 0.

Peneira (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida		Porcentagem retida acumulada	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
25	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
12,5	10,79	21,58	1,06%	2,13%	1,06%	2,13%
9,5	150,53	172,15	14,77%	17,02%	15,83%	19,15%
5,6	722,16	682,18	70,87%	67,45%	86,71%	86,60%
4,75	109,71	109,15	10,77%	10,79%	97,47%	97,39%
Fundo	25,74	26,35	2,53%	2,61%	100,00%	100,00%
Total	1018,93	1011,41	100,00%	100,00%	M1	1018,93
Módulo de finura		2,03				
						M2
						1011,41

Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 11: Análise granulométrica, agregados graúdos brita 1.

Peneira (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida		Porcentagem retida acumulada	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
25	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	85,61	47,48	8,36%	4,36%	8,36%	4,36%
12,5	834,42	934,24	81,46%	85,83%	89,82%	90,19%
9,5	101,22	102,73	9,88%	9,44%	99,70%	99,63%
5,6	3,05	4,06	0,30%	0,37%	100,00%	100,00%
4,75	0	0	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%
Fundo	0	0	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%
Total	1024,3	1088,51	100,00%	100,00%	M1	1022,94
Módulo de finura		3,96				
						M2
						1089,1

Fonte: Autoria própria (2020)

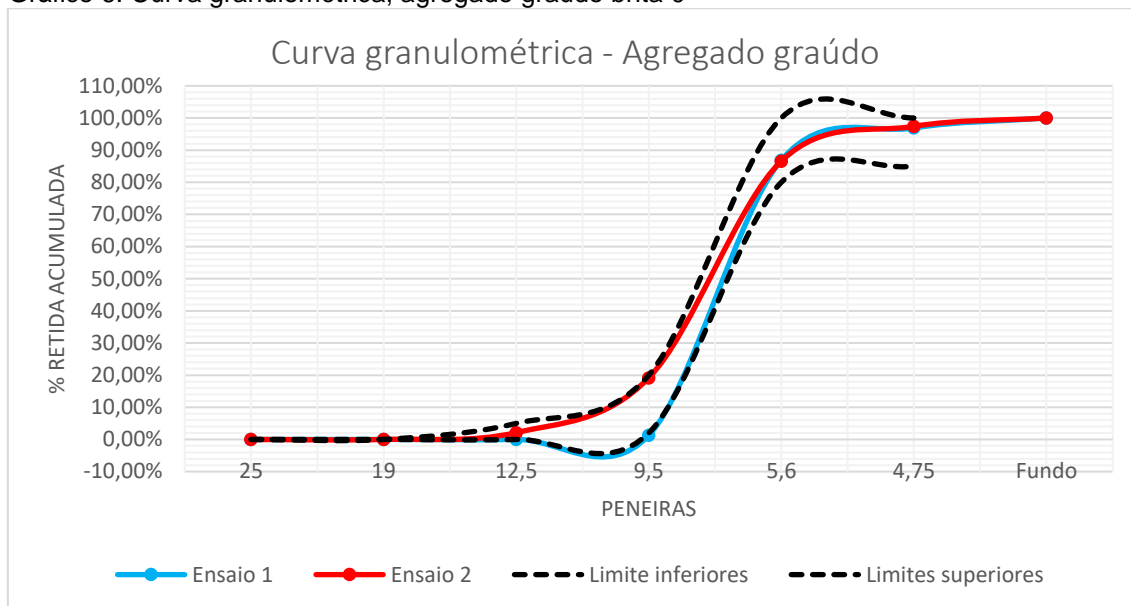
A dimensão máxima característica para o agregado graúdo de granulometria fina é de 12,5 mm. A zona granulométrica do agregado é 4,75/12,5, isso o classifica como brita 0 (ABNT NBR 7211, 2009). O módulo de finura obtido da amostra de brita 0 foi de 2,03.

A dimensão máxima característica do agregado graúdo de granulometria grossa é de 19 mm. A zona granulométrica do agregado é 9,5/25, isso o classifica como brita 1 (ABNT NBR 7211, 2009). A amostra de brita 1 o módulo de finura obtido foi de 3,96.

Com a análise dos Gráfico 6 e Gráfico 7, os quais demonstram a curva granulométrica e os limites inferiores e superiores indicados pela ABNT NBR 7211 (2009), identifica-se que curva a granulométrica da amostra de brita 0

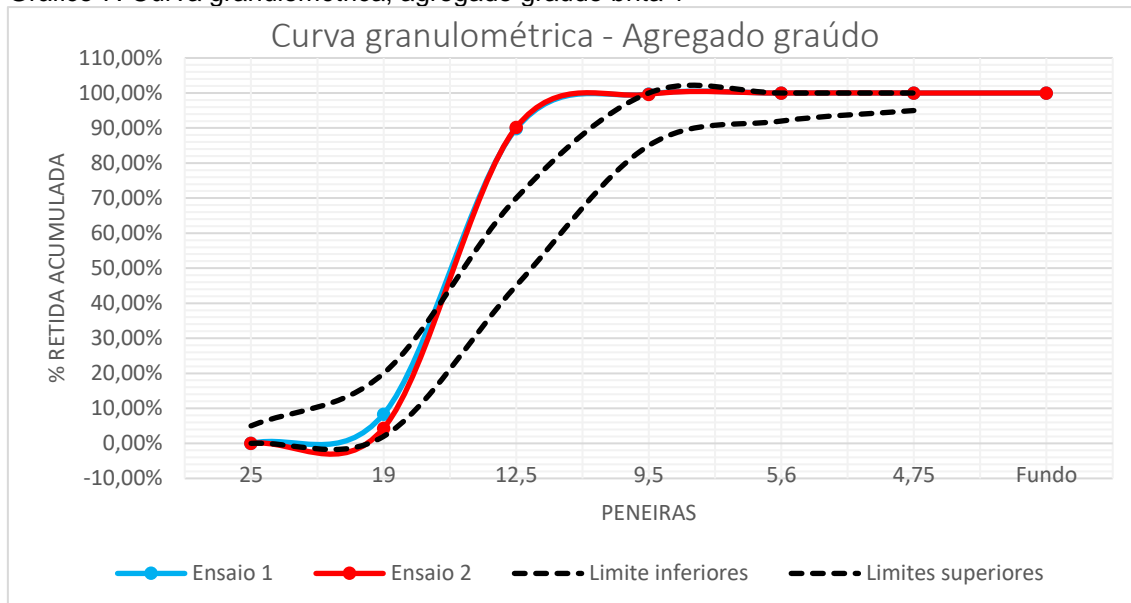
mantem-se dentro dos limites indicados na norma. A amostra de brita 1 contém um ponto fora da zona granulométrica.

Gráfico 6: Curva granulométrica, agregado graúdo brita 0



Fonte: Autoria própria (2020)

Gráfico 7: Curva granulométrica, agregado graúdo brita 1



Fonte: Autoria própria (2020)

5.1.2 Massa unitária

Massa unitária é determinada conforme ABNT NBR NM 45 (2006). No estado solto a massa unitária trata-se da razão entre a massa de um agregado

lançado em um recipiente e o volume deste recipiente. O ensaio para a determinação da massa unitária foi realizado para os agregados, grãos e miúdos.

5.1.2.1 Procedimento de ensaio – Agregados miúdos e grãos

Primeiro foi determinado e registrado a massa e o volume do recipiente vazio (m_r e V). A seguir, encheu-se o recipiente até que o mesmo transbordasse, utilizando uma concha metálica, despejando o agregado de uma altura inferior a 50 mm acima da borda superior do recipiente. Durante o procedimento evitou-se que houvesse a segregação dos agregados que compõem a amostra. Após inserir a amostra no recipiente foi feito o nivelamento da camada superficial do agregado utilizando uma espátula, de forma a rasá-la com a borda superior do recipiente vazio. Então foi determinado e registrado a massa do recipiente mais o seu conteúdo (m_{ar}).

Figura 12: Ensaio determinação da massa unitária



Fonte: Autoria própria (2020)

Com os dados obtidos no ensaio e por meio das fórmulas apresentadas abaixo foi determinado a massa unitária dos agregados.

$$\rho_{ar} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (1)$$

Onde:

ρ_{ap} : é a massa unitária do agregado, em quilogramas por metro cúbico;

m_{ar} : é a massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

m_r : é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V: é o volume do recipiente, em metros cúbicos;

Tabela 12: Massa unitária das amostras de agregados ensaiadas.

Massa unitária (kg/m ³)	
Agregados Miúdos - Areia Fina	1552,79
Agregados Miúdos - Areia Grossa	1694,34
Agregados Miúdos Reciclados	1000,63
Agregados Graúdos - Brita 0	1582,22
Agregados Graúdos - Brita 1	1562,60

Fonte: Autoria própria (2020)

5.1.5 Determinação da absorção de água

O ensaio para a determinação da absorção foi realizado conforme a ABNT NBR NM 53 (2009). A amostra para ensaio foi coletada e preparada segundo os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR NM 26 (2009).

A absorção é o processo pelo qual um líquido tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo poroso é, também, o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação a sua massa em estado seco (ABNT NBR NM 30, 2009).

5.1.4.1 Procedimento de ensaio

Separou uma amostra de aproximadamente 1000 gramas, inseriu a amostra em uma forma e levou para secar a uma temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas, então pesou a amostra e registrou (m). Em um recipiente cobrir a amostra com água e deixou descansar por 24 h. Retirou a amostra da água e estendeu em uma superfície plana. Procedeu-se a secagem até que os grãos de agregados não ficassem aderidos entre si de forma marcante. Pesou e registrou a amostra (m_s).

Por meio das fórmulas apresentadas abaixo foram realizados os cálculos para obter a absorção de água dos agregados miúdos.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

A : é absorção de água, em porcentagem;

m_s : é a massa ao ar da amostra na condição saturado e de superfície seca, em gramas;

m : a massa da amostra seca em estufa, em gramas.

A umidade obtida para a amostra de agregado brita 0 foi de 1,16%, para amostra de agregado brita 1 foi de 1,17%.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O concreto de alto desempenho é uma evolução dos concretos convencionais, utiliza basicamente os mesmos materiais, com os princípios básicos de resistência, de trabalhabilidade e de durabilidade. Entretanto, busca superar os parâmetros anteriores, para isso são necessários procedimentos especiais de alto desempenho. Os materiais componentes do concreto são heterogêneos e possuem características físicas e químicas diversificadas, portanto, a obtenção de um concreto homogêneo que atenda as características esperadas exige esforços para harmonização destes materiais (NEVILLE, 1997).

Desta forma para garantir o êxito na produção do concreto de alto desempenho é essencial que seja feita uma apuração cuidadosa da escolha dos materiais e da proporção dos mesmos. O cuidado e atenção necessários no momento da escolha dos materiais consiste especialmente no fato de que há uma grande quantidade de cimentos e agregados disponíveis, numa variedade de composições, características e propriedades, que prejudicam a escolha dos materiais a serem utilizados na dosagem (ALVES, 2000).

O estudo dos agregados é importante nos concretos de alto desempenho, pois estes podem ser o elo fraco da mistura, quando o concreto atingir resistências elevadas (AÏTCIN, 2000). A qualidade dos agregados utilizados na elaboração do concreto desempenha uma fundamental influência nas suas propriedades. Isso ocorre porque aproximadamente três quartos do volume do concreto é preenchido pelos agregados (Gjorv, 1994). Para concretos de alta resistência, a qualidade dos agregados chega a ser fator restritivo da obtenção de boa trabalhabilidade e alta resistência.

Além disso quando se trata dos agregados é fundamental fazer uma otimização da granulometria, assim alcança uma maior compactidade, utilizando-se agregados graúdos de menor diâmetro máximo e uma adequada composição de agregados miúdos (ROHDEN, 2015). A distribuição granulométrica dos agregados interfere diretamente na demanda de água da mistura, e, portanto, na trabalhabilidade do concreto. Tem-se que agregados que apresentam granulometria contínua, onde não há desprovemento ou excedente de qualquer fração do agregado, geram um melhor empacotamento, posto que as partículas menores preenchem os vazios existentes entre as partículas maiores (CASTRO, 2007).

De acordo com Alves (2000) quando se trata de agregado graúdo para concreto de alta desempenho, é necessário bastante controle das características de dimensão máxima, granulometria, forma e resistência dos grãos. Os agregados, conforme já exposto, devem ter a dimensão máxima característica limitada, pois quanto menor o agregado graúdo utilizado menor é a incidência de zonas fracas (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011). Entretanto os agregados de dimensão muito reduzida demandam quantidade maior de água de amassamento, devendo-se, novamente, encontrar o equilíbrio que proporcione as melhores propriedades nos estados frescos e endurecidos.

Os agregados graúdos devem apresentar a forma mais cúbica possível e os diâmetros máximos característicos recomendados são: 25 mm para concreto de alto desempenho classes 50 MPa e 75 MPa, 19 mm para classe 100 MPa e 12mm para Classes 125 Mpa e 150 MPa (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011). Mehta e Aitcin (1990) indicam que a Dimensão Máxima Característica notável situa-se entre 10 e 12 mm. Já Alaejos e Cánovas (1992) propõe manter a Dimensão Máxima Característica do concreto de alta resistência entre 12 e 14 mm, enquanto que o Comitê 363 do ACI (1991) recomenda a utilização de agregados com Dimensão Máxima Características entre 9,5 e 12,7 mm.

Dos agregados graúdos ensaiados nota-se que a brita 0 apresentou diâmetro máximo característico de 12,5 mm e módulo de finura 2,03. Já a brita 1 apresentou diâmetro máximo característico 19 mm módulo de finura 3,96. Em relação ao diâmetro máximo característico ambas estão dentro dos valores indicados.

Normalmente em concretos de alto desempenho ocorre uso de areia mais grossa, passa a ser aconselhável pois resulta, em um ligeiro decréscimo na quantidade de água na proporção da mistura para atingir-se determinada trabalhabilidade, uma vez que a sua superfície específica é menor, o que é vantajoso em termos de resistência e custos. Para concretos de alta resistência uma recomendação defendida por vários autores é a utilização de módulo de finura elevado para a areia, sendo indicados valores próximos a 3,0 (ACI 211.4R,1993; NEVILLE, 1997; AİTCIN, 2000). Tutikian, Isaia e Helene (2011) apontam que o agregado miúdo deve possuir, de preferência, módulo de finura entre 2,7 e 3,0, sem partículas finas, descartando-se os grãos inferiores a 5mm. Com a busca de teores adequadamente combinados de agregados graúdos e miúdos, contribuindo para minimizar o volume de espaços vazios, tem-se como

benefícios a maior resistência. Quanto maior for a densidade granular do material, menor será o volume de vazios.

A areia grossa em que foram realizados os ensaios de caracterização apresentou módulo de finura 3,13, ou seja, próximo dos valores recomendados. Já a areia fina possui dimensão máxima característica de 0,60 mm, então para o uso em concreto de alto desempenho o recomendado é remover os grãos inferiores a 5 mm. Em relação ao módulo de finura é bem abaixo comparado aos valores indicados pela literatura. O agregado reciclado apresentou módulo de finura 0,56, sendo assim é importante ter bastante cuidado na porcentagem a ser inserida na dosagem, pois à medida que aumenta a porcentagem de inserção do material consequentemente iria aumentar a demanda de água prejudicando a obtenção de altas resistências.

De acordo com o método de dosagem de ACI 211.1 (1991) existe um valor ótimo entre o volume solto do agregado graúdo e o volume total do concreto e esta relação depende somente do tamanho máximo do agregado graúdo e do módulo de finura do agregado miúdo. Desta forma com base neste método os agregados ensaiados podem ser utilizados na confecção de concretos de alto desempenho. Visto que o módulo de finura dos agregados miúdos, com exceção da areia fina, está dentro dos valores indicados e os agregados graúdos apresentou dimensão máxima característica com valores indicados para obter concreto de alto desempenho.

Mas vale ressaltar que na dosagem é fundamental ter muito cuidado na proporção dos agregados miúdos, principalmente da areia fina e no percentual de substituição de areia fina por agregado reciclado oriundo do corte e beneficiamento de mármore e granito. À medida que aumente a proporção de finos consequentemente aumenta a demanda de água. Ainda, é importante destacar, que para atingir um concreto de alto desempenho é fundamental diminuir a porosidade, por meio da modificação da estrutura dos poros, deste modo é essencial diminuir a relação água/aglomerante da quantidade total de uma amostra, isso ocorre por meio da utilização de aditivos superplastificantes. Também é primordial a inserção de aditivos minerais, neste trabalho indica-se o uso da pozolana metacaulim, que colaborem para o reforço das ligações químicas entre as partículas, visto que o aditivo mineral acarreta um refinamento dos poros do concreto (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011).

As partículas do aditivo mineral interferem na movimentação de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que normalmente fica retido sob os agregados. Além de contribuir para a diminuição da espessura da zona de transição, o material preenche os vazios deixados pelas partículas de cimento próximos à superfície do agregado e reduz a concentração do hidróxido de cálcio, formando silicato de cálcio hidratado.

7 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho consistiu em estudar o concreto de alto desempenho e avaliar a possibilidade da substituição parcial dos agregados miúdos por agregados reciclados. Esse objetivo foi proposto considerando o alto consumo do material na construção civil e em contrapartida o consumo excessivo de recursos naturais. É evidente que a construção civil é um setor que se mantém em crescimento, e isso é reflexo da necessidade de construir ambientes para as mais diversificadas atividades.

Nota-se que não é possível dar uma pausa no desenvolvimento e conseqüentemente na utilização de recursos naturais para atender a demanda do desenvolvimento sustentável, é utópico imaginar que a construção civil deixará de consumir recursos naturais. Entretanto é essencial estudar e desenvolver técnicas que minimizem a utilização de recursos naturais. A produção do concreto de alto desempenho gera a redução do uso de concreto, dado que um volume menor de concreto atende a demanda e utilizar resíduo como substituição parcial dos agregados miúdos reduz a extração de agregado natural da natureza.

Com o estudo elaborado neste trabalho nota-se que é viável a utilização de resíduos de corte e beneficiamento de mármore e granito na produção de concreto de alto desempenho desde que a porcentagem de substituição seja inferior a 20%. Além disso na produção de concreto de alto desempenho é fundamental caracterizar os agregados a serem utilizados para que sejam utilizados aqueles que encontram-se dentro das características que não prejudiquem a resistência mecânica.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se que podem ser feitos concreto de alto desempenho, utilizando na dosagem como substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de corte e beneficiamento de corte de mármore e granito com o objetivo de avaliar a influência dos agregados reciclados no concreto de alto desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAD, M. N. A.; ANDRADE, W. P.; PAULON, V. A. **Propriedades do concreto massa contendo pozolana de argila**. In: Colóquio Sobre Concreto Massa, São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 16 p. 1983

ABRELPE, 2018, **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2017**, Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf>. Acesso 30 de agosto, 2019.

ACI Committee 211.4R-93, Guide for selecting proportions for high-strength concrete with **Portland cement and fly ash**, **ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, materials and general** properties of concrete, Detroit, MI, 1993.

AÏTCIN, P.-C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Ed. Pini, 2000.

AÏTCIN, P.-C. **High performance concrete**. London: E&F SPON, 1998.

ALAEJOS GUTIÉRREZ, P.; CÁNOV AS, M.F. Composicion y dosificac ión de hormigones de alta resistencia. **Cemento y Bormigon**, n. 709, p. 971-990, ago. 1992.

ALBUQUERQUE, M. C. F.; GONÇALVES, A. C. Estudo mecânico do concreto de alto desempenho com agregado reciclado. **Holos Environment**, v. 10, n. 2, p. 153-164, 2010.

ALHADAS, Miguel Fernando Schettini et al. Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto. 2008.

ALVES, Martha Figueiredo. Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência. 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 363R-10: Report on High-Strength Concrete**. Farmington Hills, 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363. State-of-the-art Report on HighStrength Concrete. **ACI Manual of Concrete Practice**, Detroit, part 1, 48p, 1991.

ARAÚJO, D. L.; FELIX, L. P.; SILVA, L. C.; SANTOS, T. M. Influência de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção em Propriedades Mecânicas do Concreto. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, 2016.

ARAÚJO, R. M.; GOGOLA, G. W.; LIMA, A. J. M.; RISTOW, R. N.; WEBER, S. L. **Avaliação do desempenho de sílica ativa e metacaulim na composição**

de concreto de alto desempenho com emprego de agregados da região de Curitiba. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003.

Associação Brasileira de Cimento Portland (1999). **Guia básico de utilização do cimento Portland – BT 106.** 7. ed. São Paulo. 2002. 28p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004:** Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland- Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos- Especificação. 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12821:** Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15894-1:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697:** Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211:** Agregado para Concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9779:** Argamassa e concreto – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 30**: Agregados miúdos – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 52**: Agregados miúdos – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

BARATA, M. S.; MOLIN, D. C. C. **Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa**. In: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ANTAC), Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 69-78, mar. 2002.

BASTOS, Arthur Paulo Ozelame. Análise da influência de aditivos superplastificantes no comportamento de pastas de cimento Portland com e sem adição de filer calcário. 2016.

BRASIL, Resolução **CONAMA n° 307**, de 5 de julho de 2002. Gestão de resíduos e produtos perigosos – Tratamento. Publicado no DOU n° 136, de 17/07/2002, págs. 95-96.

CALDARONE, M. A. GRUBER, K. A.; BURG, R. G. High-reactivity Metakaolin: A new Generation Mineral Admixture. **Concrete International**, v. 16, n. 11, p. 37-40, nov. 1994.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F. S.; DA SILVA, S. A.; MATTOS, F. V. **Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento**. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais. Salvador, p. 64-75, 1997.

CASTRO, Alessandra Lorenzetti de. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CORDEIRO, G. C. **Concreto de alto desempenho com metacaulinita**. Dissertação de Mestrado. Campos do Goytacazes, Rio de Janeiro, 2001.

DEGEN, M. K.; VIEIRA, G. L., CALMON, J. L., ULIANA, J. G.; BASTOS, R. S. **Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de**

rochas ornamentais como substituto parcial de cimento. In: Anais do 55º Congresso brasileiro de concreto. IBRACON. 2013. p. 1-12.

FERNANDES, A. V. B.; AMORIM, J. R. R. Concreto sustentável aplicado na construção civil. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT**, v. 2, n. 1, p. 79-104, 2014.

FERNANDES, B. C. M. **A utilização de resíduos da construção civil e demolição (RCD) como agregado para o concreto.** Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário de Formiga. Formiga, 2015.

GAMEIRO, F.; DE BRITO, J.; DA SILVA, D. Correia. Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. **Engineering Structures**, v. 59, p. 654-662, 2014.

GJORV, O. E. High-Strength Concrete. In: MALHOTRA, V.M. (ed) **Advances in Concrete Technology**. Ottawa: CANMET, 1994. p. 19-82.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** Dissertação de Mestrado. NORIE/UFGRS. Porto Alegre, 2000.

ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo F. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia. Cap**, v. 36, 2011.

LEVY, S. Produzindo concretos ecológica e politicamente corretos. **Exacta**, vol. 4, núm. 2, 2006, pp. 375-384 Universidade Nove de Julho São Paulo, Brasil

LISBÔA, E. MONTEIRO. **Obtenção do concreto autoadensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** Dissertação de Mestrado. Maceió, 2004. 121p.

MEHTA, P. K., AÏTCIN, P.-C. (1990) Principles underlying production of highperformance concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates**, V. 12, N. 12, Philadelphia, pp. 70 – 78.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1a ed., São Paulo: Editora Pini, 1994.

MEHTA, P.K; AITCIN, P.C. Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High Strength Concrete. In: HSC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION ON HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, (CA). **ACI SP-121**. Bekkeley, (CA): W.T.Hester, 1990a. p. 265-286.

MONFARDINI, L. **Hiperplastificantes e superplastificantes para concreto: alto desempenho com apelo sustentável.** Construchemical. n. 16. 2014. (p.10-18).

NEVILLE, A. M. Propriedade do Concreto. São Paulo: Editora Pini, 1997

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, 2016.

OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2007

OLIVEIRA, T. Y. M. **Estudo sobre o uso de materiais de construção alternativos que otimizam a sustentabilidade em edificações**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA, T. Y. M. **Um estudo sobre o concreto de alto desempenho**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual Feira de Santana. Feira de Santana, 2010.

ONÇALVES, J. P.; MOURA, W.A. **Reciclagem do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na construção civil**. In: Anais do III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 26 a 29 de novembro de 2002, Recife. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. p.179-189.

PALOMO, A.; BLANCO-VARELA, M. T.; GRANIZO, M. L.; PUERTAS, F., VAZQUEZ, T.; GRUTZECK, M. W. (1999) Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. **Cement and Concrete Research**, V. 29, pp. 997 – 1004.

PEDROSO, F. L. **Concreto & Construções**: concreto: material construtivo mais consumido no mundo. São Paulo: Ippis, v. 1, n. 53, 2009. Trimestral

QUEIROZ, F. C.; FRASCÁ, M. H. B. O. Estudo para o aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento Portland. **Exacta**, v. 6, n. 1, p. 83-92, 2008.

ROHDEN, Abrahão Bernardo. Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho. 2012.

SANTOS, A. **Aliado do cimento, Metacaulim expande mercado no Brasil**, 2012. Disponível em: < <http://www.cimentoitambe.com.br/aliado-do-cimento-metacaulim-expande-mercado-no-brasil/>>. Acesso em: 24 agosto 2019.

SANTOS, J. L.; LAGO, P. I. S.; OLIVEIRA, D. G. Revisão integrativa: reutilização de resíduos da construção civil. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 8, n. 2175–1846, p. 16–27, 2017.

SARDINHA, Manuel; DE BRITO, Jorge; RODRIGUES, Ricardo. Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge. **Construction and building materials**, v. 119, p. 45-52, 2016.

SILVA, D. M. Influência da mistura de agregados graúdos, resíduos de corte de mármore e granito e metacaulim e aditivos no desempenho mecânico do concreto. **Revista de Ciências e Tecnologia**, v. 12, n. 12, p. 2-8, 2018.

VALENTINA, Luiz Veriano Oliveira Dalla. Giacomini; FAGANELLO, Luciana. SEMPTIKOVSKI, Simone Claudiano. Resistência mecânica de concretos obtidos com Incorporação do subproduto do corte e Acabamento de mármore e granito. **Anais do III Encontro de Sustentabilidade em projeto do Vale do Itajaí, Camboriú. III Ensus. Camboriú: Univali, 2009.**

VICENTINI, Alan Henrique; ASSUNÇÃO, Camila Cassola; AKASAKI, Jorge Luis. Estudo do metacaulim para obtenção e produção de concreto autoadensável (CAA). **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 4, 2016).