

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Clóvis de Medeiros Dantas Júnior

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE QUARTZITO PARA APLICAÇÃO EM
PAVIMENTOS INTERTRAVADOS**

Campina Grande – PB

2019

Clóvis de Medeiros Dantas Júnior

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE QUARTZITO PARA APLICAÇÃO EM
PAVIMENTOS INTERTRAVADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito à obtenção do título de **Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Campina Grande – PB

2019

D192u Dantas Júnior, Clóvis de Medeiros.
Utilização de resíduos de quartzito para aplicação em pavimentos intertravados / Clóvis de Medeiros Dantas Júnior. – Campina Grande, 2019.
58 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.
"Orientação: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves".
Referências.

1.Quartzito. 2.Agregados alternativos. 3.Pavimento intertravado. 4.Pré-moldado. 5.Concreto. I. Neves, Gelmires de Araújo. II. Título.

CDU 552.45(043)

VITAE DO CANDIDATO

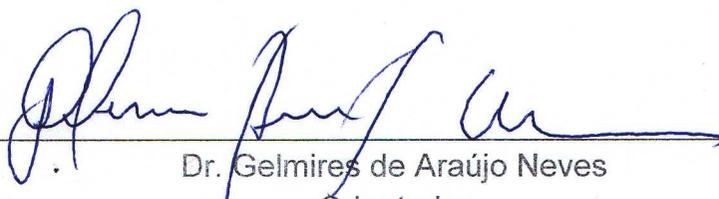
- Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB (2009)

CLÓVIS DE MEDEIROS DANTAS JÚNIOR

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE QUARTZITO PARA APLICAÇÃO EM
PAVIMENTOS INTERTRAVADOS

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de **Mestre
em Ciência e Engenharia de
Materiais**.

Aprovado em: 28/02/2019



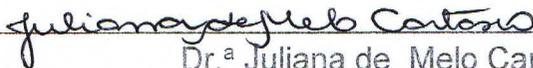
Dr. Gelmires de Araújo Neves
Orientador
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG



Dr. Romualdo Rodrigues Menezes
Examinador Interno
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG



Dr.ª Sâmea Valensca Alves Barros
Examinadora Externa
DCETH/UFERSA



Dr.ª Juliana de Melo Cartaxo
Examinadora Externa
UAEMa/UFCG

AGRADECIMENTOS

Quando se busca um objetivo na vida, há vários obstáculos que devem ser desviados para que o mesmo seja alcançado. Não é que a vida de repente ficou mais fácil e você conseguiu atingir o que almeja da noite pro dia, a vida e suas escritas sempre vão bater forte, mas é com o seu esforço e ajuda de pessoas iluminadas que entram no seu caminho, que isso vai se tornar algo alcançável. São essas pessoas a quem venho agradecer.

A Deus, pois sem ele somos apenas passageiros de um ônibus vazio, a fé nos dá o suporte para agarrar naquele momento mais difícil.

Aos meus pais, Clóvis Dantas e Maria de Fátima, por tudo que representam e estão presentes quando mais se precisa. A base de tudo, o exemplo e a inspiração, vocês são a minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gelmires Neves, pelo conhecimento, orientação, suporte e ajuda na execução desse trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, em especial o Prof. Dr. Romualdo Menezes, pelos conhecimentos compartilhados durante todo o período do mestrado.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), em especial a Prof.^a Dr.^a Ana Maria, pelo suporte na execução dos experimentos do trabalho.

E por fim, mas não menos importante, ao Laboratório de Tecnologia de Materiais (LTM) e todos os que fazem parte desse espaço, sempre agradável e acolhedor, que me apoiou e deu suporte em todas as etapas da realização desse trabalho.

RESUMO

Estudos demonstram que os resíduos da extração e beneficiamento dos quartzitos podem ser substitutos das matérias primas convencionais utilizadas na construção civil porque apresentam propriedades similares a esses, após passarem por processo de beneficiamento que os deixam na granulometria dos agregados naturais. A exploração crescente das rochas de quartzito no município de Várzea/PB ocasiona a busca por soluções que promovam a destinação correta dos resíduos gerados nesse processo. Devido às propriedades desse material, percebe-se um bom proveito dos resíduos no emprego em pavimentos intertravados, que são produzidos com peças de concreto pré-moldadas em seu revestimento, onde os resíduos de quartzito atuam como substituto aos agregados convencionais nas peças. Nessa perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo produzir peças de concreto pré-moldadas com resistência à compressão simples similar às peças produzidas com materiais convencionais e submetê-las ao estudo de durabilidade. Os resíduos de quartzito foram coletados aleatoriamente no entorno das jazidas no município de Várzea/PB, em seguida beneficiados, passando pelos processos de britagem, moagem e peneiramento. Posteriormente, realizou-se a caracterização química, física e mineralógica do agregado oriundo dos resíduos. Logo após, confeccionou-se as peças com esses resíduos que foram submetidas ao estudo da resistência à compressão simples. Os resultados mostraram similaridade entre os dois tipos de peças, os blocos feitos com os resíduos apresentaram uma coloração mais clara do que os com os materiais convencionais e os blocos fabricados com grãos finos em uma certa quantidade obtiveram melhor comportamento mecânico, adequados para serem utilizados em calçadas de tráfego de pedestres.

Palavras-chave: quartzito; agregados alternativos; pavimento intertravado; pré-moldado; concreto.

ABSTRACT

Studies show that residues from the extraction and processing of quartzites can be substitutes for the conventional raw materials used in civil construction because they have similar properties to them after they have undergone process of processing that leave them in the granulometry of the natural aggregates. The increasing exploration of the quartzite rocks in the municipality of Várzea / PB leads to the search for solutions that promote the correct destination of the residues generated in this process. Due to the properties of this material, we can see a good advantage of the residues in the use of interlocking pavements, which are produced with precast concrete pieces in its coating, where the quartzite residues act as a substitute for the conventional aggregates in the pieces. In this perspective, the present work aims to produce precast concrete pieces with a resistance to simple compression similar to the pieces produced with conventional materials and subject them to the study of durability. The quartzite residues were collected randomly around the deposits in the municipality of Várzea / PB, then benefited, through the crushing, grinding and sieving processes. Subsequently, the chemical, physical and mineralogical characterization of the aggregate from the residues was carried out. Soon after, the pieces with these residues were made and submitted to the study of the resistance to simple compression. The results showed similarity between the two types of pieces, the blocks made with the residues presented a lighter coloration than those with the conventional materials and the blocks manufactured with fine grains in a certain quantity obtained better mechanical behavior, suitable for use in pedestrian traffic sidewalks.

Keywords: quartzite; alternative aggregates; interlocked pavement; pre-molded; concrete.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura típica de um pavimento intertravado. | 17 |
| Figura 2 – Vista superior do assentamento do pavimento intertravado. | 18 |
| Figura 3 - Localização de Várzea/PB. | 21 |
| Figura 4 – Extração de quartzito no município de Várzea – PB. | 22 |
| Figura 5 – Resíduos de quartzito (aparas) no município de Várzea – PB. | 23 |
| Figura 6 - Fluxograma com as etapas de trabalho. | 25 |
| Figura 7 - DRX para as amostras Q1 e P1. M - Mica; Q – quartzo; F - Feldspato; D - Dolomita. | 30 |
| Figura 8 – Análise granulométrica do resíduo de quartzito Q1 (a) e P1 (b). | 33 |
| Figura 9 – Confecção de mesa vibratória elétrica. | 38 |
| Figura 10 – Preparação da mistura. | 39 |
| Figura 11 – Moldagem e rompimento de blocos de concreto. | 40 |
| Figura 12 – Resultados de resistência à compressão iniciais. | 40 |
| Figura 13 – Resultados de resistência à compressão. | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição química dos resíduos de quartzitos obtido pela fluorescência de raios X. OO: outros óxidos. | 29 |
| Tabela 2 - Análise granulométrica de Q1 pelo met. de peneiramento do resíduo. | 31 |
| Tabela 3 - Análise granulométrica dos materiais convencionais pelo método de peneiramento. | 32 |
| Tabela 4 - Fração volumétrica para diâmetros (D) abaixo de 2 µm, entre 2 e 20 µm e acima de 20 µm, para as amostras Q1 e P1. | 34 |
| Tabela 5 - Massa unitária do agregado graúdo convencional. | 35 |
| Tabela 6 - Guia para avaliação da qualidade do agregado baseado em resultados de ensaios laboratoriais. | 36 |
| Tabela 7 - Valores determinados e teores máximos permitidos nos extratos lixiviado e solubilizado da areia de quartzito e do pó de quartzito. | 37 |
| Tabela 8 - Traço usual adotado para produção dos pavimentos intertravados. | 39 |
| Tabela 9 - Proporções em quilogramas de traço inicial para moldagem. | 40 |
| Tabela 10 - Traço calculado pelo método de Mehta (2008). | 41 |
| Tabela 11 - Composições dos traços convencionais e alternativos incorporados com resíduos de quartzitos em quilogramas. | 42 |
| Tabela 12 - Fator de água aglomerante, absorção de água de amassamento e resistência à compressão simples dos traços convencionais e alternativos. | 44 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 13 |
| 2.1 | Objetivo Geral | 13 |
| 2.2 | Objetivos Específicos | 13 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 3.1 | Resíduos como agregados em concretos | 14 |
| 3.2 | Pavimentos intertravados | 16 |
| 3.3 | Rochas ornamentais: quartzito | 19 |
| 3.4 | Quartzito de Várzea – PB..... | 21 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 24 |
| 4.1 | Materiais | 24 |
| 4.2 | Métodos | 24 |
| 4.2.1 | Preparação das amostras | 24 |
| 4.2.2 | Metodologia..... | 25 |
| 4.2.3 | Ensaio de caracterização | 25 |
| 4.2.4 | Confecção de mesa vibratória elétrica..... | 26 |
| 4.2.5 | Escolha e cálculo do traço (mistura) do concreto | 27 |
| 4.2.6 | Preparação dos blocos pré-moldados de concreto..... | 27 |
| 4.2.7 | Determinação da resistência à compressão simples dos blocos | 28 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 29 |
| 5.1 | Caracterização | 29 |
| 5.1.1 | Caracterização química, física e mineralógica das matérias-primas..... | 29 |
| 5.1.2 | Caracterização ambiental dos resíduos de quartzito | 36 |
| 5.2 | Adensamento das peças de concreto pré-moldadas | 38 |
| 5.3 | Escolha do traço inicial, dosagem e resultados de RCS..... | 39 |

| | |
|--|----|
| 5.4 Considerações sobre a resistência à compressão obtida nas peças..... | 45 |
| 6 CONCLUSÃO | 47 |
| 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 48 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |
| APÊNDICE | 57 |

1 INTRODUÇÃO

A exploração mineral no Brasil se intensifica a cada ano e a construção civil é um dos setores que mais demanda esse aumento, onde se inclui o uso de rochas com caráter ornamental. Devido ao crescimento populacional associado à intensa industrialização e ao advento de novas tecnologias, o consumo de matéria-prima tem se tornado desmesurável, havendo, portanto, a necessidade da utilização de resíduos que ocupam um maior volume nos aterros, ocasionados pela própria construção civil, devido à grande demanda do país (Fernandes *et al.*, 2011).

O Brasil é destaque mundialmente na exportação de rochas ornamentais, figurando entre os maiores exportadores. A produção total de rochas ornamentais no Brasil, no ano de 2017, foi estimada em 9,24 milhões de toneladas, sendo 3,24 milhões de toneladas destinadas ao mercado externo, representando 35% do total produzido (Abirochas, 2018). Com a produção em larga escala, observa-se um crescimento da problemática ambiental envolvendo o descarte desses resíduos, exigindo urgência no desenvolvimento de novos materiais onde em sua estrutura sejam aproveitados esses resíduos (Santos *et al.*, 2014; Abirochas, 2018).

Dentre as rochas ornamentais metamórficas, tem-se o quartzito, com tendências coesivas e características específicas como estrutura cristalina densa e organizada, o que propiciam indícios que a sua aplicabilidade como agregados para utilização na produção de concreto possam ser favoráveis (Santos *et al.*, 2014). A cidade de Várzea no estado da Paraíba tem um grande respaldo em âmbito nacional na extração e beneficiamento primário do quartzito com caráter ornamental, o ciclo de produção do quartzito gera toneladas de resíduos que podem ser reaproveitados em outros materiais (Santos *et al.*, 2014), onde se requer a gestão adequada desses processos, sendo esta uma questão de grande importância ambiental e econômica nos dias atuais (Torres *et al.*, 2009; Bacarji *et al.*, 2013; André *et al.*, 2014; Tennich *et al.*, 2015).

De acordo com informações do município de Várzea / PB, cerca de 12 toneladas de quartzito são beneficiadas por mês nas empresas, onde cerca de 2 toneladas são descartadas no meio ambiente em forma de aparas e meia tonelada na forma do pó coletado da serra de corte das placas.

Um dos produtos que pode fazer uso de materiais oriundos da exploração mineral no seu processo de obtenção, são as peças pré-moldadas de concreto (PPC) que são duráveis e rígidas, podendo ser utilizadas para a construção de pavimentos intertravados, conhecidos pela sua estética, capacidade estrutural e integração com o meio ambiente. O concreto é o material mais utilizado na construção civil e tem contribuído para o avanço da civilização durante anos, porém essa atividade demanda uma quantidade significativa de recursos naturais no âmbito da produção de cimento e agregados (Bacarji et al., 2013; André et al., 2014). A obtenção desses materiais ocasiona problemas ambientais significativos porque gera a exploração desenfreada dos recursos naturais, além de gerar resíduos que são descartados inadequadamente no meio ambiente, fato que popularizou pesquisas sobre agregados reciclados para uso no concreto em todo o mundo (Çakır, 2014; Silva *et al.*, 2015; Omary *et al.*, 2016).

Unindo a problemática do descarte dos resíduos de quartzito com a necessidade de agregados naturais do concreto, pode-se construir um material mais sustentável e com semelhantes características. Esse concreto produzido com agregados de materiais reciclados é conhecido como recycled concrete aggregate (concreto com agregados reciclados - RCA) e os resíduos de quartzito podem ser classificados como agregados naturais reaproveitados (Çakır, 2014; Abirochas, 2018).

Gabr *et al.* (2013) analisaram a influência desses agregados nas propriedades do concreto para pavimentos em suas bases e sub-bases. Cabello *et al.* (2013) avaliaram a viabilidade do uso dos resíduos de quartzito gerados em Minas Gerais, como agregados em argamassas e peças pré-moldadas de concreto, os resultados mostraram a viabilidade do uso dos resíduos para essas funções. O quartzito foi estudado como agregado viável em argamassas (Barros *et al.*, 2016), porém esse estudo não mencionava a interação do quartzito como agregado no concreto com função estrutural em revestimentos de pavimentos, mais especificamente o pavimento intertravado. A crescente aplicação do pavimento intertravado no Brasil requer produtos mais sustentáveis no mercado, como alternativa ao pavimento produzido com concreto formado de agregados de brita e areia.

Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo produzir peças pré-moldadas de concreto com agregado oriundo dos resíduos de quartzito coletados no município de Várzea/PB.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade da incorporação do resíduo de quartzito em blocos de concreto para aplicação no revestimento de pavimentos intertravados.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física, química, mineralogicamente e ambientalmente o resíduo de quartzito;
- Analisar a efetividade no adensamento do concreto fresco em uma mesa vibratória elétrica piloto;
- Determinar um traço usual para moldagem de peças de concreto para pavimentos intertravados;
- Comparar os resultados obtidos de resistência à compressão simples (RCS) com a norma brasileira e americana específica dos blocos fabricados com materiais convencionais da construção civil, assim como os blocos com quartzito incorporado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos como agregados em concretos

O material de construção mais utilizado no mundo é o concreto. Ele geralmente é composto por uma mistura de cimento Portland com areia (agregado miúdo), brita (agregado graúdo) e água. Deste modo, o concreto é usado comumente como material estrutural, tendo ótimas propriedades mecânicas e resistência à água. Geralmente as estruturas em que o concreto é empregado são estacas, fundações, sapatas, lajes, vigas, colunas, tubos, barragens, revestimento de canais e pavimentos (Hoppen *et al.*, 2006; Borges *et al.*, 2014). A popularidade do concreto também está ligada ao seu baixo custo e a rápida disponibilidade do material para obras civis (Mehta e Monteiro, 2008).

A reciclagem e reuso de agregados, são alternativas para minimizar o impacto gerado pelo consumo de agregados convencionais no meio ambiente. Ao alterarmos esses agregados, propriedades no concreto são modificadas tais como: densidade, absorção de água, porosidade e heterogeneidade. Consequentemente, as mudanças nessas propriedades poderão reduzir a resistência à compressão do concreto, também influenciada pela interferência na região frágil matriz-agregado, conhecida por zona de transição (Martínez *et al.*, 2013).

Em seus estudos, Farias Filho et al. (2011) estudaram argamassas alternativas incorporadas com resíduos de construção civil e da serragem do granito, obtendo resultados que evidenciaram a ação da formação de silicoaluminatos de cálcio e potássio que proporcionaram aumento do comportamento mecânico dos produtos.

Outra aplicação dada aos resíduos das rochas ornamentais é o uso na confecção de blocos pré-moldados para alvenaria de vedação, como substituição parcial do cimento, destacando-se o estudo de Moura e Leite (2011), que comprovou a viabilidade da utilização do resíduo de serragem do granito para este fim.

Santos et al. (2012), demonstraram que a substituição do agregado natural por resíduo proveniente da britagem do granito refletiu positivamente na resistência à compressão (RCS) e flexão da argamassa.

A resistência à compressão de um concreto a uma certa idade, curado submerso em água à temperatura ambiente, depende de diversos fatores, tais como a granulometria dos agregados e sua porosidade, mas principalmente da relação água/cimento (a/c) e o grau de adensamento (Neville, 1997). A relação a/c determina a porosidade da pasta de cimento em qualquer estágio de hidratação e a medida que essa relação aumenta ocorre um enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade. Durante a dosagem da massa do concreto, objetiva-se obter uma massa homogênea a olho nu, que pode ser comprovada no local de moldagem através de um ensaio de abatimento do concreto fresco (slump test), verificando a consistência da massa e se há excesso ou falta de água (Mehta, 2008). Se for comprovada uma falta de água, pode ser adicionada na massa um aditivo plastificante ou mais água, que é chamada de água de amassamento, porém é destacado que esse acréscimo de água pode afetar diretamente na sua resistência mecânica, enfraquecendo a massa do concreto.

Segundo Leite (2001), os concretos produzidos com agregados reaproveitados também obedecem a lei de Abrams, ao qual diz que quanto maior a relação água/cimento, menor será a resistência do concreto à compressão, resistência ao qual estamos interessados no presente estudo. O autor também comprovou que o grau de hidratação do concreto influencia diretamente na resistência à compressão, semelhante a um concreto produzido com agregados convencionais, porém em níveis diferentes. Quando se usa agregados reaproveitados de outros materiais, a relação a/c e a quantidade de agregado graúdo são os fatores que mais influenciam na resistência final dos concretos.

Outra característica que influencia na resistência à compressão do concreto é a forma, textura e dimensões máximas dos agregados reaproveitados, requerendo um ensaio de análise granulométrica para sua determinação. A forma e textura superficial e mineralógica das partículas de agregados influenciarão nas características da zona de transição na interface matriz-agregado, afetando a resistência mecânica. Os agregados de quartzito possuem forma mais angular, o que influencia na trabalhabilidade do concreto no estado fresco.

Com relação ao aumento da dimensão máxima dos agregados graúdos, Metha e Monteiro (2008) observaram que para uma mesma mineralogia, podem-se ter dois efeitos opostos na resistência do concreto. Com um mesmo consumo de

cimento e consistência, dosagens com partículas maiores de agregados requerem menos água do que os que contêm agregados menores. Por outro lado, com agregados maiores, temos uma zona de transição na interface mais fraca. O resultado então vai variar de acordo com a relação água/cimento e o tipo de adensamento.

Segundo os autores acima citados, outro fator que contribui com a resistência do concreto é a porosidade do agregado. Com um ensaio de massa específica podemos determinar essa propriedade e compararmos com os agregados naturais. A porosidade influencia na absorção de água, agregados mais porosos terão maior absorção de água. No processo de cura do concreto a água em excesso será eliminada deixando vazios. (Gomes e Rodrigues, 2000)

Silva, R. *et al.* (2014) obtiveram propriedades melhoradas com o uso de concretos reciclados como agregados, porém enfatizaram o contrário quanto ao uso de agregados provenientes de alvenaria e asfaltos reaproveitados. Os autores destacam a importância do estudo dos agregados reaproveitados e destacam a necessidade desses estudos para aplicabilidade em pavimentos, substituindo os agregados convencionais (Silva, 2014). O uso dos resíduos de quartzito influenciará nas propriedades citadas, requerendo um estudo de caracterização do agregado e os seus efeitos na resistência à compressão do concreto nas primeiras idades (7 e 28 dias). A resistência à compressão do concreto também pode ser estimada para o concreto com idades mais longas, observando sempre se esta resistência está de acordo com a exigida na NBR 9781 (ABNT, 2013).

3.2 Pavimentos intertravados

Segundo a NBR 15953 (ABNT, 2011), os pavimentos intertravados são estruturas formadas por várias camadas, descritas em ordem ascendente, são elas: subleito, sub-base (opcional), base, camada de areia de assentamento e revestimento.

A pavimentação com peças pré-moldadas de concreto tem como principal característica o fato de ser simplesmente assentado, devidamente confinado, sobre uma camada de areia, ressaltando que há necessidade de compactação com máquina na área em que os blocos forem assentados. O conceito básico desse tipo de pavimentação é o intertravamento, ou seja, a transmissão de parte da carga de uma

peça para a peça vizinha pelo atrito lateral entre elas. Outra característica desse sistema é o fato de ser levemente permeável, pois permite a passagem de uma pequena parte da água da chuva para o solo, através das juntas. O fato de ser mais claro que o asfalto, proporciona uma menor absorção de calor proveniente dos raios solares, fato que se traduz em maior conforto térmico superficial. A propriedade diferencial para essa técnica construtiva de pavimentação é poder ser desmanchada e reconstruída com 100% de aproveitamento das peças. Por fim, a diversidade de formas, cores e modelos disponíveis permite à peça grande competitividade com opção de pavimentação de áreas de trânsito de pedestres ou veículos de passeio ou carga (Müller, 2005; Fernandes, 2013).

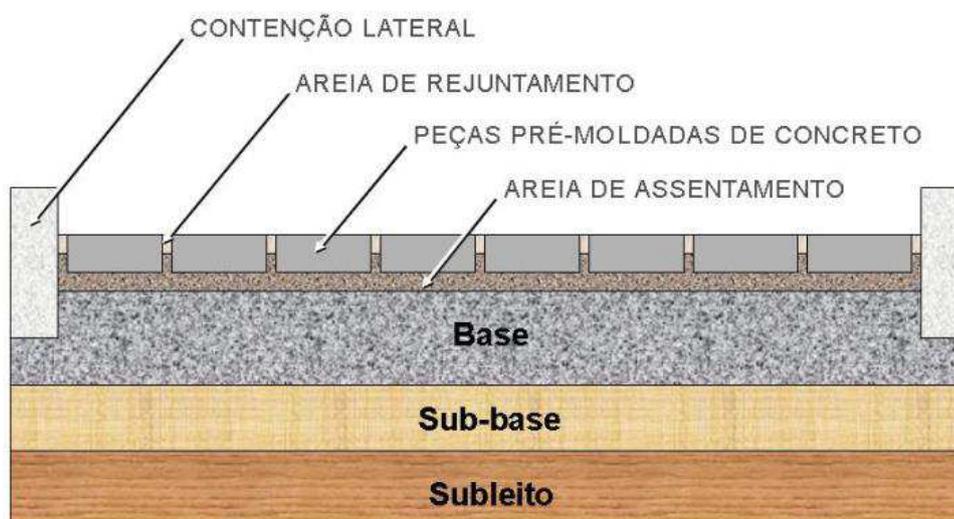


Figura 1 – Estrutura típica de um pavimento intertravado (Hallack, 2001)

As peças pré-moldadas de concreto (PCC) possuem formatos e arranjos variados, desde segmentadas ou retangulares, até trapezoidais e hexagonais, arranjas de forma que fazem um travamento entre si, havendo uma melhor distribuição de tensões e evitando deformações nas peças. A espessura das peças depende da intensidade do tráfego, com recomendações de dimensões de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013).

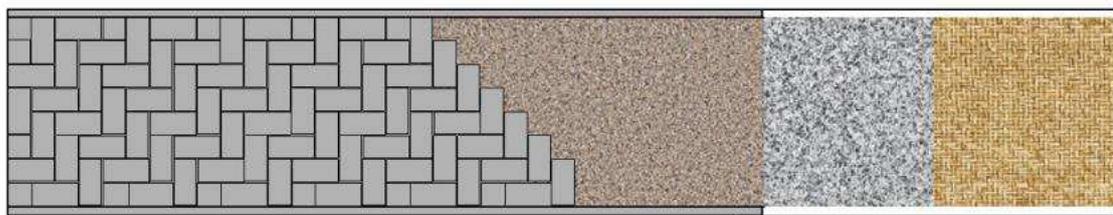


Figura 2 – Vista superior do assentamento do pavimento intertravado (Hallack, 2001)

O assentamento mostrado na Figura 2 para os pavimentos intertravados é o mais usual, fornecendo entre as peças, um intertravamento horizontal, vertical e rotacional (em torno do eixo de cada peça), eles atuam em serviço simultâneo, resistindo à possíveis cargas em todas as direções causadas pelo tráfego de pessoas e veículos.

As principais vantagens do uso do pavimento intertravado são: trincas e imperfeições nas camadas abaixo não são transmitidas ao revestimento, permitem o uso imediato do pavimento após o seu assentamento e compactação, permitem um fácil reparo quando a sua estrutura é comprometida, permitem a reutilização e reaproveitamento das peças de concreto, têm execução simples e com baixo custo, resistem à derramamento de óleos e combustíveis, requerem pouca manutenção, o controle de qualidade das peças de concreto pode ser feito nos próprios centros de produção, dentre outras.

No entanto, alguns problemas podem ocorrer na produção ou na execução das peças. Beaty e Raymond (2005) e Mudiyono (2015) atribuem os defeitos nestes pavimentos a fontes potenciais que se relacionam com vários fatores, tais como o arranjo geométrico inadequado para o assentamento das peças de concreto, uso de areia imprópria para a camada de assentamento, largura incorreta das juntas entre as peças, seja pela falta de espaçadores na própria peça, seja por procedimento construtivo inadequado e uso de areia imprópria para o preenchimento das juntas ou procedimento inadequado de preenchimento. Outro defeito bastante conhecido é a contenção lateral ineficaz das peças, permitindo movimentos laterais e perda de intertravamento entre elas e ainda a utilização de peças com formatos e tamanhos diferentes, drenagem deficiente e existência de zonas de transição.

Fernandes (2013) acrescenta como limitações o fato de que não se deve usar estes pavimentos como canais coletores de águas que possam gerar correntes volumosas e rápidas ou submetidos a jatos de água sob pressão, sob pena de perda

da selagem das juntas. O autor conclui que geração de níveis de ruído maiores do que aqueles gerados por outros tipos de pavimentos provocam maior vibração nos veículos, requerendo processo construtivo acurado, ainda que de acordo com parâmetros simples, porém estritos (tolerâncias de nivelamento, largura de juntas, compactação, escolha de areias, etc.), que devem ter estruturas de drenagem e contenção lateral bem projetadas e bem construídas.

Gencel *et al.* (2012) estudaram o efeito do uso de resíduos de mármore em peças pré-moldadas de concreto para pavimentos. Apesar da resistência à compressão ter decaído com o aumento da porcentagem dos resíduos de mármore nas peças, os autores obtiveram resultados satisfatórios dessa resistência aos 28 dias. Silva, F. M. *et al.* (2014) estudaram a resistência à compressão de blocos de concreto para pavimentos intertravados com adição de fibras de aço e os resultados foram satisfatórios. É provável que grandes porcentagens de resíduos de quartzito incorporados nas peças de concreto causem perda de resistência, porém que a mesma se mantenha dentro dos limites aceitáveis exigidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

A norma C936/C936M (ASTM, 2015) determina que as peças sejam submetidas aos ensaios de resistência à compressão, absorção de água, ciclos de gelo e degelo, resistência à abrasão e avaliação dimensional. A norma brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013) exige apenas que os blocos se encaixem dentro de limites de resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão, ressaltando que no presente trabalho, apenas a resistência à compressão foi levada em consideração e que para utilização nos pavimentos, os outros fatores teriam que ser atendidos. O valor de 35 MPa de RCS é exigido na norma brasileira para esses blocos.

3.3 Rochas ornamentais: quartzito

Rochas ornamentais são materiais que podem ser utilizados em revestimentos de pisos e paredes devido à sua estética e facilidade de extração (blocos ou placas), cortados de formas variadas e beneficiados por esquadrejamento, polimento, dentre outros. As principais rochas ornamentais são os granitos, mármore, quartzitos e silexitos (Bezerra, 2009).

O quartzito é uma rocha metamórfica com textura sacaroide que tem em sua composição percentual acima de 75% de quartzo, derivado de sedimentos arenosos. É uma rocha com dureza de média para alta e de forma compacta, com brilho semelhante ao quartzo. Além de quartzo, os quartzitos podem possuir em sua composição outros minerais acessórios, como feldspato, moscovita e biotita. O conhecimento da composição mineralógica é importante porque a predominância de um destes minerais determina algumas propriedades destas rochas, como por exemplo, a interpenetração dos grãos de quartzo que confere à rocha uma grande tenacidade (Fernandes *et al.*, 2003; Russo, 2011; Pontes *et al.*, 2013). Outra característica é que o quartzito pode variar com a coloração de acordo com a composição mineralógica, desde brancos e cinzas até vermelhos e amarelos (Abirochas, 2018).

Com tendência a ser coeso, o quartzito tem estrutura cristalina densa e organizada de modo que a força do cimento entre as partículas propicia uma resistência interna alta. Isso mostra que é possível usar o quartzito como componente estrutural de obras, apresentando características favoráveis para o uso da rocha como agregado no concreto (Santos *et al.*, 2014).

De acordo com Costa *et al.* (2000), que estudaram as rochas ornamentais do estado de Minas Gerais, os quartzitos comerciais lá encontrados podem ser:

- Com alto grau de recristalização e granulação em tons de azul, cinza azulado e rosa (presença de dumortierita ou cianita);
- Quartzitos com alto conteúdo de minerais micáceos;
- Pouco recristalizados em tons de rosa (meta-arenitos e meta-arcósios).

Barros *et al.* (2016) estudaram a incorporação de resíduos finos de quartzito em argamassas, analisando a durabilidade do material através da reação álcali-agregado, demonstrando que pode ocorrer a reação álcali-agregado caso não se utilize um Cimento Portland capaz de mitigar essas reações.

Tufail *et al.* (2017) estudaram as propriedades mecânicas de concretos produzidos com quartzitos como agregados e outros materiais em temperaturas normais e elevadas. Os resultados quando comparados com os do granito em temperaturas normais foram similares, mostrando mais uma vez a boa associação que o quartzito tem quando utilizado como um agregado no concreto. O quartzito não

apresentou bons resultados quando o concreto foi elevado em temperaturas acima de 150 °C.

3.4 Quartzito de Várzea – PB

O município de Várzea / PB está situado na região do Seridó ocidental do estado da Paraíba, a 320 quilômetros da capital paraibana, João Pessoa. Está limitado ao norte com os municípios de Ouro Branco (RN) e São José do Sabugi (PB), ao leste com o município de Santa Luzia (PB) e ao sul com o município de São Mamede (IBGE, 2013).

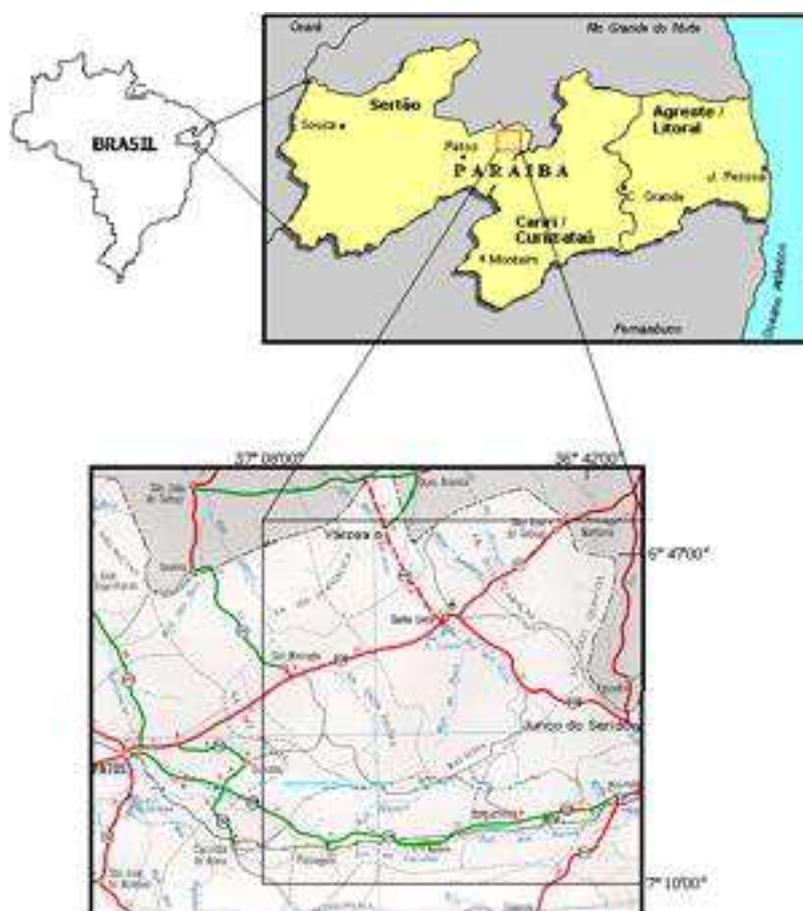


Figura 3 - Localização de Várzea/PB (CDRM, 2013).

O quartzito encontrado em Várzea é aproveitado sob a forma de lajota quadrada ou retangular, utilizado em diversos setores da construção civil. A coloração do quartzito da região é bem variada e o material possui textura granuloblástica, com

granulação que varia de fina a média. Além dessas características, o quartzito dessa região é resistente à abrasão, antiderrapante, não conserva calor nem retém água e é bastante coeso. Alguns dos minerais acessórios presentes nesse quartzito são: muscovita, clorita, epidoto, magnetita-silimanita, feldspato, dentre outros (Souza *et al.*, 2002; Babisk *et al.*, 2012).



Figura 4 – Extração de quartzito no município de Várzea – PB (Fonte própria)

Em Várzea, as placas de quartzito são extraídas nas pedreiras há décadas, com técnicas artesanais utilizando ferramentas manuais após prévio desmonte com explosivos, com grandes desperdícios das placas menores e irregulares (aparas). Essas técnicas causaram um aproveitamento insatisfatório das reservas minerais, gerando uma grande quantidade de resíduos com danos ao meio ambiente, saúde e segurança dos trabalhadores envolvidos na atividade (Souza *et al.*, 2008; Vidal *et al.*, 2015). Alguns dos produtos finais originados com a exploração do quartzito em Várzea / PB, são: ladrilhos, mosaicos para pisos e fachadas, bancadas, placas para áreas de piscina, dentre outros. Existem cerca de 10 indústrias beneficiadoras da rocha na região.



Figura 5 – Resíduos de quartzito (aparos) no município de Várzea – PB (Fonte própria)

Os resíduos de quartzito gerados em Várzea são:

- Resíduos grossos de diferentes cores (branco, dourado, rosa, verde e preto);
- Resíduos finos das serrarias (provenientes dos tanques de decantação do pó da serra de corte).

Os resíduos grossos são constituídos de pequenas placas (resíduos da extração) e aparas geradas pelas serrarias. A serraria Pedras Itacolomy e a empresa Tecquímica, fornecem ainda, essas aparas britadas ou moídas em diferentes granulometrias. Os resíduos finos são gerados pelo corte da rocha e são descartados pelas serrarias na forma de efluentes, conduzidos à tanques de decantação. Nesses tanques é realizada uma separação água/sólido (Vidal *et al.*, 2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais convencionais utilizados nessa pesquisa foram: Cimento Portland CP II (Nassau[®], Sociedade Brasileira de Cimento Portland), agregado graúdo de brita comercial de granito (diâmetro 9 mm), pó de brita e areia. Esse cimento foi escolhido para o estudo do envelhecimento natural do concreto por ser um cimento usual da construção civil e ser mais acessível nas cidades do interior do estado da Paraíba, onde essa pesquisa pode ter um bom impacto, almejando a resistência exigida na NBR 9781 (ABNT, 2013) de 35 Mpa nos blocos pré-moldados. A reação álcali agregado não foi considerada no presente trabalho, analisada anteriormente por Barros *et al.* (2016), bem como os ensaios previstos na norma de absorção de água do bloco pronto e resistência à abrasão.

Os materiais alternativos utilizados foram resíduos do beneficiamento do quartzito cedidos pelas empresas Pedras Itacolomy e Tecquímica do Brasil, localizadas no município de Várzea - PB. Eles foram utilizados em substituição total ou parcial dos agregados naturais do concreto denominados como: cascalho (brita 9 mm) e areia formados da moagem das aparas de quartzito (Q1) e o pó da serra (P1), proveniente do corte das placas de quartzito. Para adensamento do bloco, uma mesa vibratória elétrica foi utilizada. Por ser de difícil acesso, a mesa foi projetada e confeccionada localmente por metalúrgico em parceria com o autor deste trabalho, descrita mais à frente.

4.2 Métodos

4.2.1 Preparação das amostras

A brita e areia de quartzito foram oriundas de um processo de britagem e moagem das aparas de quartzito, que resultam de corte das placas dessa rocha. A brita foi classificada em peneiras da ABNT abaixo do número 1/2" (12,5 mm) e a areia em peneiras abaixo do número 4 (4,8 mm). Esses processos de britagem e moagem foram realizados pela empresa Tecquímica do Brasil, que já cedeu esses materiais

com a granulometria utilizada. A empresa Pedras Itacolomy forneceu a fração fina utilizada, pó oriundo do corte, serragem e polimento das placas de quartzito. Para ensaios laboratoriais de caracterização, amostras peneiradas de pó fino, previamente trituradas, com partículas menores que 150 microns foram preparadas.

4.2.2 Metodologia

A metodologia utilizada para desenvolvimento deste trabalho de pesquisa está descrita por etapas de acordo com o fluxograma na Figura 6.

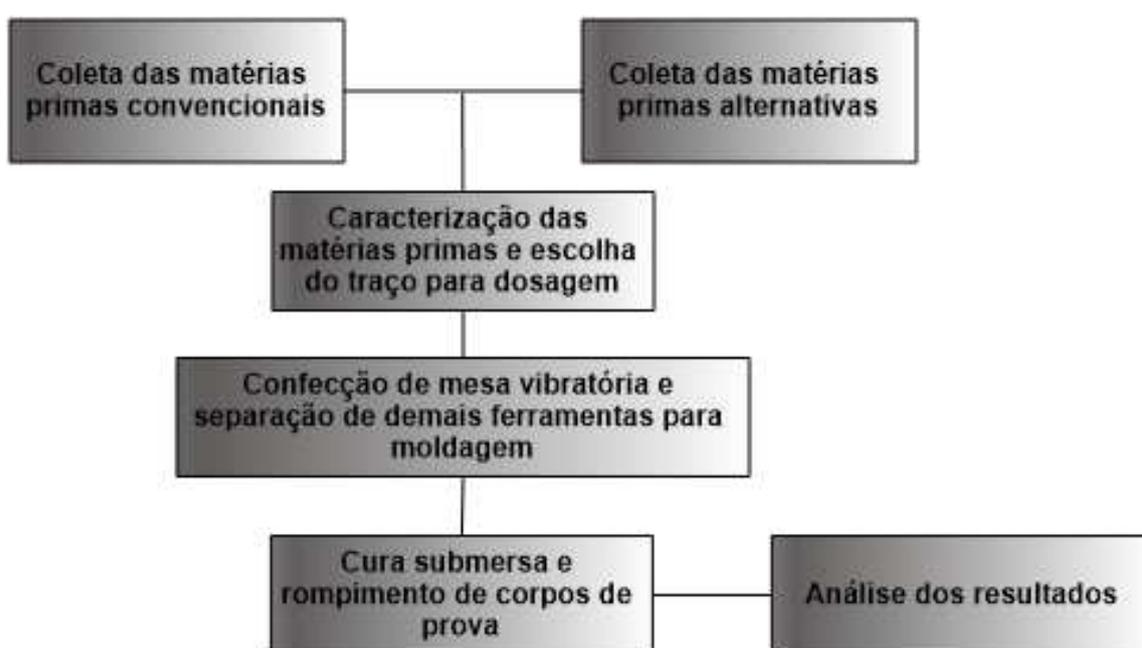


Figura 6 - Fluxograma com as etapas de trabalho

4.2.3 Ensaio de caracterização

4.2.3.1 Caracterização química, física e mineralógica

A caracterização física das amostras estudadas foi realizada através da determinação dos seguintes parâmetros: massa específica real determinada no picnômetro a gás Quantachrome, Ultrapyc 1200e, granulometria por peneiramento seguindo os procedimentos da NBR NM 248 (2001) para o agregado graúdo e granulometria por difração a laser que combina a relação proporcional entre a difração

do laser, a concentração e o tamanho de partículas, para o agregado miúdo. Nos materiais convencionais foram realizados os ensaios de massa unitária e análise granulométrica por peneiramento para fornecimento de parâmetros de dimensão máxima e módulo de finura, necessários para o cálculo do traço do concreto. Essa caracterização foi realizada no laboratório de tecnologia de materiais (LTM/UFCG).

A análise química foi realizada através de espectrometria de fluorescência de raios X (EDX), com detector EDS (Shimadzu EDX 720) para obter os óxidos presentes na composição das amostras.

A caracterização mineralógica foi realizada utilizando a difração de raios X (DRX) que consiste em uma análise qualitativa capaz de identificar as fases mineralógicas presentes na amostra. Para esta análise, as amostras são colocadas em porta amostra de alumínio e depois no Difratorômetro Shimadzu XRD-6000 com radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40kV, corrente de 30mA, modo de escaneamento por passos (fixed time scan), com passo de 0,02 e tempo de contagem de 0,6s, com ângulo 2θ percorrido de 5° a 60° .

Esse ensaio foi realizado no laboratório de caracterização de materiais (LCM/UFCG).

4.2.3.2 Caracterização ambiental

A caracterização ambiental dos resíduos de quartzito ocorreu de acordo com a execução das análises químicas dos extratos lixiviados e solubilizados por absorção atômica, utilizando Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn como parâmetros. O equipamento usado na realização dessa análise foi o Espectrofotômetro de Absorção Atômica da PerKin Elmer, modelo AAnalyst 200 e com utilização de gás acetileno, por calibração de 1, 5, 10 e 20ppm. Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados de acordo com as seguintes normas: NBR 10005 (ABNT, 2004a), NBR 10006 (ABNT, 2004b) e TCLP 1311 (US EPA, 1992).

4.2.4 Confeção de mesa vibratória elétrica

Sabe-se que o adensamento do concreto melhora suas propriedades pois diminuem a quantidade de água na mistura. Para os blocos de concreto com duas

dimensões maiores que sua altura, costuma-se utilizar um adensamento por vibração uniforme no corpo físico, tornando as mesas vibratórias uma boa opção para esse adensamento. Uma mesa vibratória impulsionada por motor elétrico foi produzida em parceria com metalúrgico e utilizada no presente trabalho, fornecendo bons movimentos para que a água em excesso seja expulsa do corpo de prova, melhorando suas propriedades.

4.2.5 Escolha e cálculo do traço (mistura) do concreto

Para escolha do traço utilizado na dosagem, foram analisadas misturas de concretos usuais, utilizadas na produção desse tipo de bloco para revestimento de pavimentos intertravados. Posteriormente, foi utilizado o método de Mehta (2008) para dosagem de concreto e preparação de novos blocos. Esse método é mais usual para outros tipos de estruturas, tais como pilares, vigas, lajes, etc., porém nada impede que esse método seja utilizado em misturas de blocos pré-moldados, visto que mesmo que a resistência requerida no trabalho não fosse alcançada no concreto com materiais convencionais, ainda assim, esse valor serviria como comparação para se analisar o decréscimo ou aumento da resistência nos blocos feitos com agregados reciclados. O método de Mehta (2008) é baseado nas recomendações do Instituto de Concreto Americano (ACI), que é aceito nos Estados Unidos e em muitos países do mundo. O método segue 9 passos onde são escolhidas características da mistura, tais como: abatimento, tipo de construção, consumo de cimento, etc. Um exemplo detalhado se encontra no Apêndice deste trabalho, ao qual apresenta uma rotina de cálculo programada no Software Mathcad.

4.2.6 Preparação dos blocos pré-moldados de concreto

Foram moldados quatro corpos de prova paralelepipedais com dimensões de (20 x 10 x 6) cm para cada um dos traços definidos, tanto para os feitos com materiais convencionais, como os feitos com resíduos de quartzito. Após 24 horas foram desmoldados e colocados em tanques submersos onde passaram por uma cura de 7 ou 28 dias. Foram utilizados no processo, formas plásticas para blocos, balança de precisão e desmoldante aplicado com pincel nas formas para um desmolde sem que

os blocos fossem danificados. Para melhor homogeneidade da massa, foi utilizada uma betoneira elétrica com capacidade de 400 litros. Esse ensaio foi realizado no laboratório de tecnologia de materiais (LTM/UFCG) e no laboratório de engenharia de pavimentos (LEP/UFCG).

4.2.7 Determinação da resistência à compressão simples dos blocos

A resistência à compressão simples foi determinada com velocidade de carga de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997), foram usados quatro corpos de prova paralelepipedais com dimensões de $(20 \times 10 \times 6)$ cm para cada um dos traços. Esse ensaio foi realizado no laboratório de engenharia de pavimentos (LEP/UFCG).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização

5.1.1 Caracterização química, física e mineralógica das matérias-primas

Na Tabela 1 estão contidos os valores obtidos na análise química por fluorescência de raios X (EDX, Shimadzu 720), das amostras Q1 e P1.

Tabela 1 - Composição química dos resíduos de quartzitos.

| Amostra | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | CaO | MgO | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | BaO | TiO ₂ | OO |
|---------|------------------|--------------------------------|------------------|-----|-----|--------------------------------|-----------------|-----|------------------|-----|
| Q1 | 70,0 | 18,0 | 6,7 | 1,0 | 1,6 | 1,7 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,0 |
| P1 | 78,0 | 11,0 | 4,6 | 2,0 | 1,7 | 1,3 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |

*OO: outros óxidos

Analisando os resultados da Tabela 1, Q1 e P1 apresentaram teores elevados de sílica (70,0% e 78,0%) e de alumina (18,0% e 11,0%). A sílica presente nos resíduos é proveniente da sílica livre, feldspato e mica. Há uma grande quantidade de potássio nos resíduos (6,7% e 4,6%) que, provavelmente, está relacionado com a mica presente nestes materiais. Os baixos teores de MgO (1,6% e 1,7%) e CaO (1,0% e 2,0%) são oriundos dos carbonatos. Os teores de Fe₂O₃ de 1,7% para o resíduo Q1 e de 1,3% para o resíduo P1, são provenientes provavelmente da mica e do baixo teor de fases de ferro cristalizado, tais como hidratos de ferro. Valores similares aos encontrados neste trabalho foram detectados na análise química de resíduos finos de quartzito realizada por Carreiro et al. (2016). As fases encontradas no resíduo utilizado também são bem similares aos encontrados por outros pesquisadores que trabalharam com o resíduo de quartzito de Portugal (Torres *et al.*, 2007).

A Figura 7 ilustra os resultados das curvas de raios X, dos resíduos Q1 (aparas de quartzito moídas) e P1 (pó de corte da serra) utilizados nesta pesquisa.

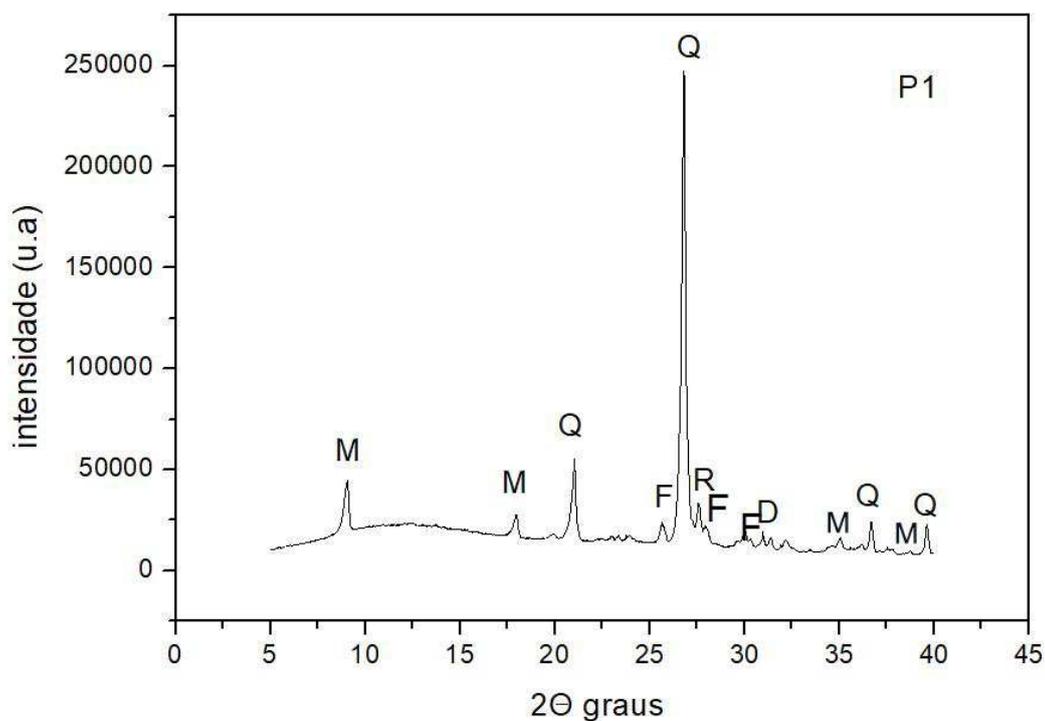
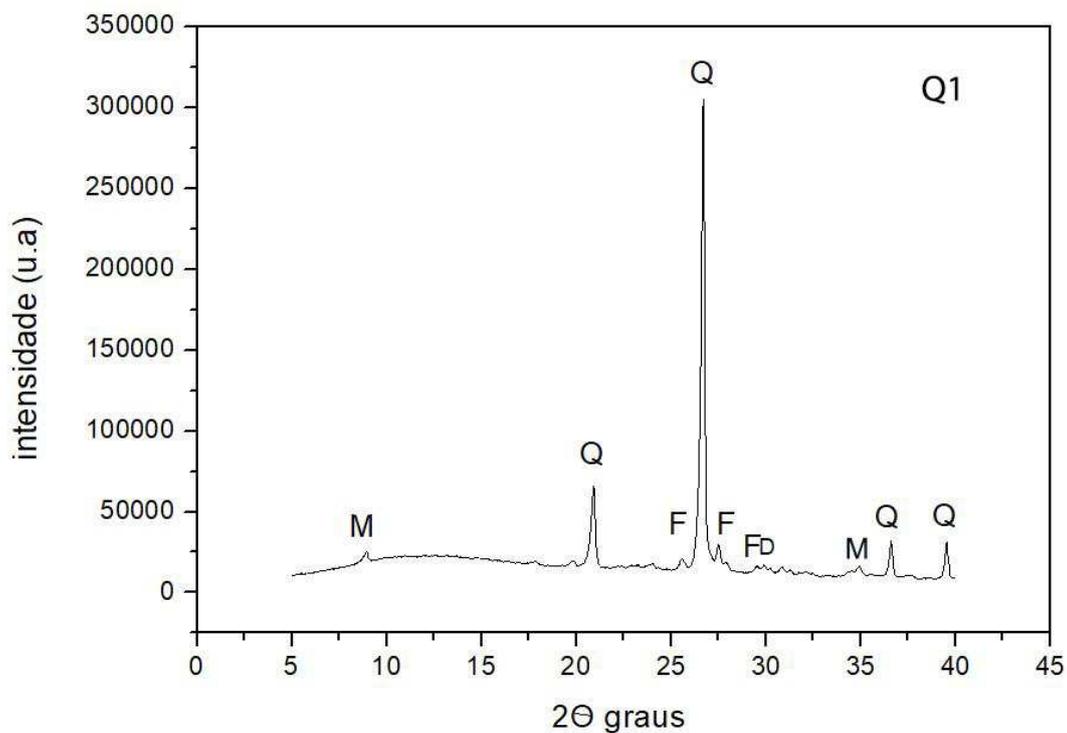


Figura 7 - DRX para as amostras Q1 e P1. M - Mica; Q – quartzo; F - Feldspato; D - Dolomita.

Observou-se que as amostras estudadas apresentaram as seguintes composições mineralógicas: mica (JCPDS: 83-1808), quartzo (JCPDS:46-1045),

feldspato (JCPDS:89-8574), e dolomita (JCPDS: 89-5862). Para composição da amostra P1 todas as fases cristalinas, além do microclina (JCPDS: 19-0932), que é um feldspato potássico. No geral, os espectros da difração de raios X confirmaram qualitativamente que as amostras apresentaram curvas típicas dos materiais residuais do município de Várzea no estado da Paraíba e com outros minerais acessórios, sendo similares aos estudos realizados anteriormente (Santos *et al.*, 2014; Neto *et al.*, 2015).

Todas as amostras apresentaram quartzo em suas composições como também caulinita, comprovando os resultados da análise química. Estes resultados se assemelham aos encontrados por Vijayalakshmi *et al.* (2013) para resíduos de granito.

A Tabela 2 ilustra o resultado da análise granulométrica pelo método de peneiramento para a amostra graúda (Q1 9mm).

Tabela 2 – Análise granulométrica de Q1 pelo método de peneiramento do resíduo.

| Peneira (mm/Mesh) | Massa Retida (g) | % | % acumulada |
|-------------------|------------------|--------|-------------|
| 9,5 mm (Dmáx) | 360 | 12,00 | 12,00 |
| 4,8 mm | 695,4 | 23,18 | 35,18 |
| 2,4 mm | 879,9 | 29,33 | 64,51 |
| 1,2 mm | 600,6 | 20,02 | 84,53 |
| 600 | 318,9 | 10,63 | 95,16 |
| 300 | 110,7 | 3,69 | 98,85 |
| 150 | 15,6 | 0,52 | 99,37 |
| Passante | 18,9 | 0,63 | 100,00 |
| Total (g) | 3000 | 100,00 | MF = 4,90 |

Analisando a Tabela 2 vemos que o agregado de dimensão máxima na amostra é de 9,5 mm, visto que a amostra passou por completa na peneira de 19 mm. Essa informação é de suma importância para a definição do traço, assim como o

cálculo do módulo de finura, onde podemos ter uma percepção do consumo de água dentro da mistura, que foi de 4,90.

A Tabela 3 mostra o resultado da análise granulométrica pelo método de peneiramento para os materiais convencionais, areia e brita comercial de 4,8 mm a 9 mm (pedrisco ou brita 0), resultado que nos dá a dimensão máxima do agregado e o módulo de finura, usados para o cálculo do traço do concreto conforme Mehta (2008).

Tabela 3 – Granulometria dos materiais convencionais pelo met. de peneiramento

| Areia (3 kg) | | | | Brita (5 kg) | | | |
|--------------|------------|-------|-------------|--------------|--------|-------|-------------|
| Peneira | Retido (g) | % | % acumulada | Peneira | Retido | % | % acumulada |
| 19 mm | - | - | | 19 mm | - | | |
| 9,5 mm | - | - | | 9,5 mm | 67,2 | 1,34 | 1,34 |
| 4,8 mm | - | - | | 4,8 mm | 3393,4 | 67,87 | 69,21 |
| 2,4 mm | 9,2 | 0,31 | 0,31 | 2,4 mm | 1457,5 | 29,15 | 98,36 |
| 1,2 mm | 771,7 | 25,72 | 26,03 | 1,2 mm | 43,8 | 0,88 | 99,24 |
| 0,600 mm | 1020,2 | 34,01 | 60,04 | 0,600 mm | 7,6 | 0,15 | 99,39 |
| 0,300 mm | 852,5 | 28,42 | 88,46 | 0,300 mm | 6 | 0,12 | 99,51 |
| 0,150 mm | 276,1 | 9,20 | 97,66 | 0,150 mm | 6 | 0,12 | 99,63 |
| Passante | 70,3 | 2,34 | 100 | Passante | 18,5 | 0,37 | 100 |
| Total (g) | 3000 | 100 | - | Total (g) | 5000 | 100 | - |

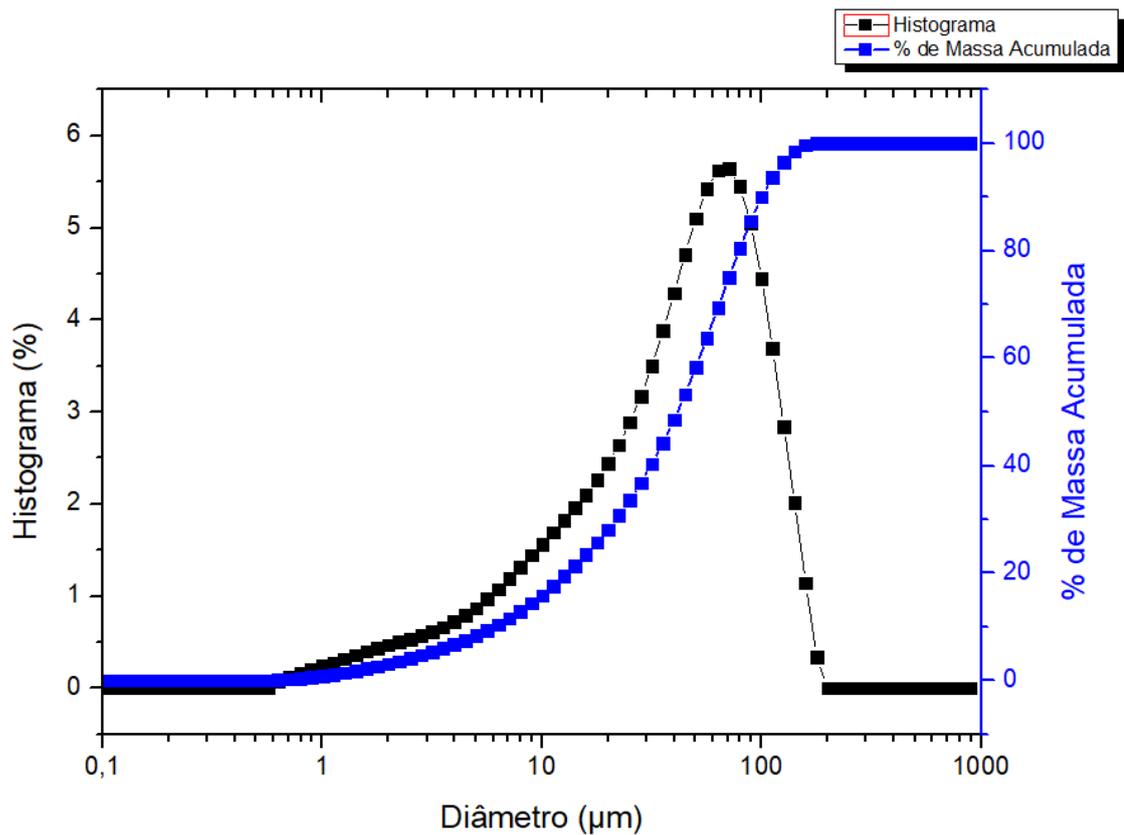
Analisando a Tabela 3 vemos que o agregado de dimensão máxima na amostra é de 9,5 mm, visto que a amostra passou por completa na peneira de 19 mm, porém para efeito de cálculo do traço, a dimensão máxima do agregado é de 4,8 mm, visto que são necessários que 5% fiquem retidos e na peneira de 9,5 mm apenas 1,34% ficaram retidos. A dimensão máxima da areia, portanto, é de 1,2 mm. Essa informação é de suma importância para a definição do traço, assim como o cálculo do módulo de finura, onde podemos ter uma percepção do consumo de água dentro da mistura.

O módulo de finura dos materiais convencionais é um parâmetro adimensional que é calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, divididas por 100.

$$MF_{\text{fareia}} = \frac{0,31 + 26,03 + 60,04 + 88,46 + 97,66}{100} = \frac{272,5}{100} = 2,725 \quad (1)$$

$$MF_{\text{brita}} = \frac{1,34 + 69,21 + 98,36 + 99,24 + 99,39 + 99,51 + 99,63}{100} = \frac{566,68}{100} = 5,6668 \quad (2)$$

Na Figura 8 encontram-se os resultados referentes às análises granulométricas dos resíduos de quartzito.



(a)

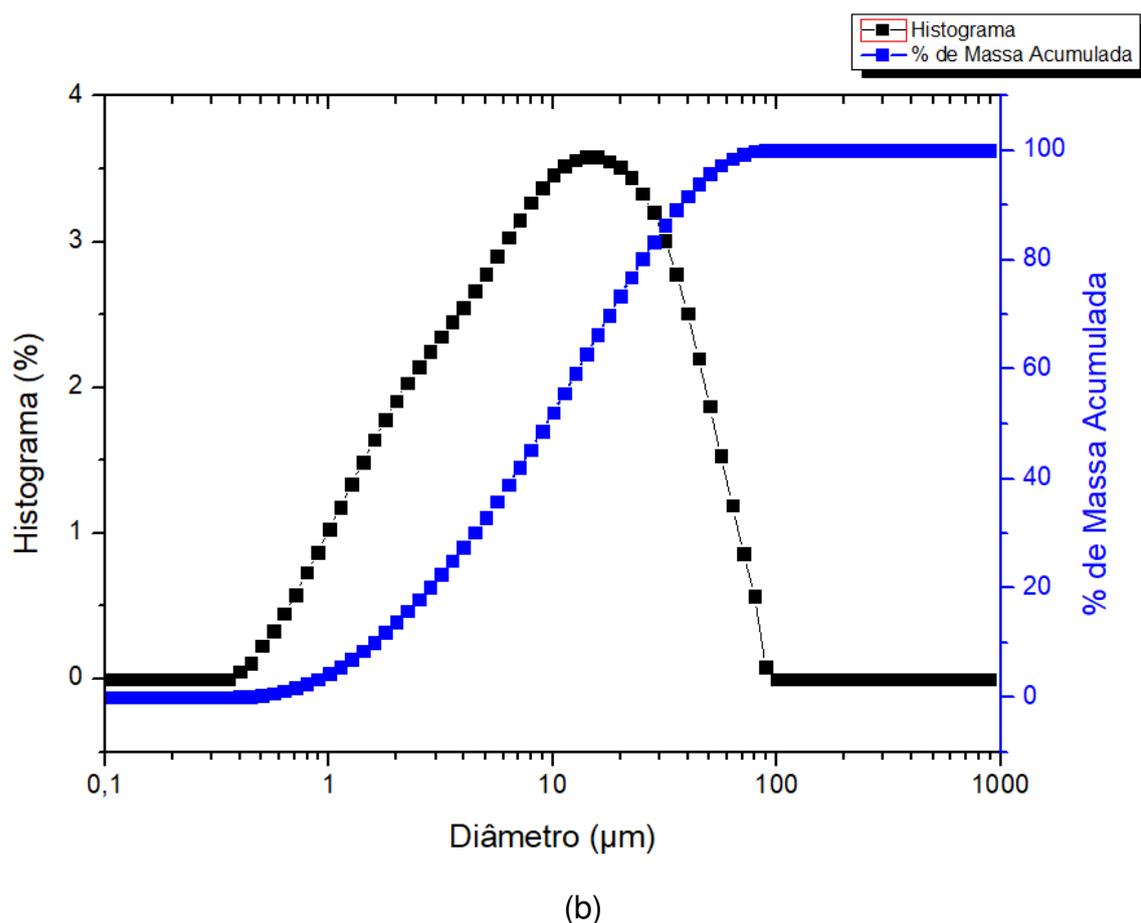


Figura 8 – Análise granulométrica do resíduo de quartzito Q1 (a) e P1 (b).

Observando a Figura 8, é possível observar que o resíduo Q1 tem um diâmetro médio de partículas de 41,4 μm e o resíduo P1 de 9,34 μm . As curvas do histograma apresentam apenas um pico, portanto são unimodais, sendo o pico do resíduo Q1 localizado mais à direita (maiores partículas).

A Tabela 4 ilustra os resultados da distribuição granulométrica das amostras miúda e graúda.

Tabela 4 - Fração volumétrica para diâmetros (D) abaixo de 2 μm , entre 2 e 20 μm e acima de 20 μm , para as amostras Q1 e P1.

| Composição | D < 2 μm (%) | 2 μm < D < 20 μm (%) | D > 20 μm (%) | D(0,9) (μm) | D(0,5) (μm) | D(0,1) (μm) |
|------------|----------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| P1 | 97,35 | 0,31 | 2,33 | 36,87 | 9,34 | 1,58 |
| Q1 | 1,27 | 98,36 | 0,35 | 100,28 | 41,40 | 6,08 |

Por meio dos resultados da Tabela 4, percebe-se que o resíduo de quartzito P1 apresenta de massa acumulada de 97,35% abaixo de $D < 2 \mu\text{m}$, este valor pode ser justificado por se tratar de um resíduo oriundo da serragem das placas de quartzito. No entanto, observa-se para o resíduo Q1 elevada percentagem de massa acumulada de (98,36%) entre ($2 \mu\text{m} < D < 20 \mu\text{m}$), esse resultado pode ser atribuído a origem do resíduo que foi oriundos das aparas das chapas. Esses resultados comparados com dados da literatura conduzem a aplicação na produção de pavimentos conforme os estudos anteriores (Santos *et al.*, 2014; Neto *et al.*, 2015; Omary *et al.*, 2016; Gholampour *et al.*, 2017).

A Tabela 5 mostra o resultado do ensaio de massa unitária para a brita 0 (pedrisco) convencional, valor de suma importância no cálculo do traço (Mehta, 2008).

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \text{ (kg / dm}^3\text{)} \quad (3)$$

Onde,

ρ_{ap} : Massa unitária do agregado graúdo

m_{ar} : Massa do conjunto agregado recipiente

m_r : Massa do recipiente

V: volume do recipiente

Tabela 5 – Massa unitária do agregado graúdo convencional.

| Amostra | Peso Medido (kg) | Peso sem recipiente (kg) | Massa unitária (kg/dm ³) |
|-----------|---------------------|-----------------------------|---|
| Amostra 1 | 22,254 | 17,920 | 1,31552 |
| Amostra 2 | 22,383 | 18,049 | 1,32499 |
| Amostra 3 | 22,429 | 18,095 | 1,32837 |
| Média | 22,355 | 18,021 | 1,32293 |

Os valores de massa específica do resíduo Q1 de quartzito foi de 2,6748 g/cm³ em seu estado bruto e de 2,6325 g/cm³ peneirado e triturado anteriormente com diâmetro menor que 0,150 mm. De acordo com a Tabela 6, esses valores mostram

que o quartzito é considerado um agregado de qualidade boa pois se assemelha com as massas dos materiais convencionais (Gomes e Rodrigues, 2000).

Tabela 6 – Guia para avaliação da qualidade do agregado baseado em resultados de ensaios laboratoriais (Gomes e Rodrigues, 2000).

| Ensaio | Excelente | Bom | Razoável | Ruim |
|--|-----------|-----------|-----------|------|
| Massa específica seca (g/cm ³) | >2,9 | 2,6 – 2,9 | 2,3 – 2,6 | <2,3 |

5.1.2 Caracterização ambiental dos resíduos de quartzito

Com base nos valores encontrados para o extrato lixiviado (Tabela 7), o resíduo de quartzito é classificado ambientalmente como resíduo perigoso, de acordo com a norma 10004 (ABNT, 2004c).

A areia quartzito (Q1) apresenta os seguintes contaminantes: arsênio (5,96 vezes acima do valor máximo permitido), alumínio (24,2 vezes acima do valor máximo permitido), ferro (5,57 vezes acima do valor máximo permitido) e manganês (3,68 vezes acima do valor máximo permitido). O pó de quartzito (P1) apresenta as seguintes contaminantes: arsênio (7,7 vezes acima do valor máximo permitido), alumínio (198,5 vezes acima do valor máximo permitido), cobre (1,27 vezes acima do valor máximo permitido), ferro (17,8 vezes acima do valor máximo permitido) e manganês (9,68 vezes acima do valor máximo permitido). Para os contaminantes em comum, os teores mais elevados encontram-se no pó de quartzito.

Tabela 7 - Valores determinados e teores máximos permitidos nos extratos lixiviado e solubilizado da areia de quartzito e do pó de quartzito

| | Valor determinado no extrato lixiviado (mg/L) | | | Valor determinado no extrato solubilizado (mg/L) | | |
|----|---|------|---------------------------------------|--|-------|---------------------------------------|
| | Q1 | P1 | Teores máximos permitido ^a | Q1 | P1 | Teores máximos permitido ^a |
| Al | 4,84 | 39,7 | 0,20 | 4,7 | 0,2 | 0,2 |
| As | 29,8 | 38,5 | 5,0 | 19,8 | 26,7 | 0,01 |
| Ba | 0,45 | 1,2 | 70,00 | 0,37 | 0,08 | 0,7 |
| Cd | 0,13 | 0,01 | 0,50 | 0,135 | <0,05 | 0,005 |
| Cr | 0,22 | 0,05 | 5,0 | 0,22 | 0,01 | 0,05 |
| Cu | 0,05 | 2,54 | 2,0 | 0,05 | 0,02 | 2,0 |
| Fe | 1,67 | 5,34 | 0,30 | 1,67 | 0,01 | 0,3 |
| Ni | 0,03 | 1,17 | 7,0 | 0,03 | <0,01 | 0,07 |
| Mn | 1,47 | 3,87 | 0,40 | 1,46 | 0,01 | 0,1 |
| Zn | 0,23 | 0,53 | 5,0 | 0,19 | 0,02 | 5,0 |

^a NBR 10004 (ABNT, 2004c)

Fonte: Adaptado das planilhas obtidas na análise química por absorção atômica dos extratos lixiviados e solubilizados realizada pela Funmineral – Barros (2016).

Os resultados (Tabela 7) advertem sobre a necessidade da reutilização dos resíduos de quartzito, com a imobilização de metais pesados como a principal prioridade, em vez de apenas incidindo sobre a quantidade de resíduo adicionado à mistura ou a sua resistência mecânica pura. De acordo com Gerven *et al.* (2004), os resíduos sólidos que apresentam metais pesados na sua constituição, quando reutilizados em matrizes de cimento, pode ter a lixiviação destes elementos controlada. O autor ainda afirma que a carbonatação da portlandita Ca(OH)_2 e / ou do silicato de cálcio hidratado (HSC) da matriz de cimento pela ação de dióxido de carbono, carbonatos, promove mudanças na solubilidade dos componentes e na porosidade da matriz do cimento, e redução da lixiviação de metais pesados. Os

resultados mostram o quartzito como um resíduo perigoso para o meio ambiente, reafirmando a necessidade de estudos na área.

5.2 Adensamento das peças de concreto pré-moldadas

O adensamento escolhido para a produção do material foi através de mesa vibratória, onde as formas posicionadas no seu tabuleiro sofrem movimentos cíclicos com frequências por igual, elevando a água e retirando um número alto de vazios dentro do concreto causados também pelo ar preso na massa. A mesa foi projetada e confeccionada em oficina de metalurgia. A mesa produzida tem motor de 1,5 CV, polia com correia e tabuleiro de 2 camadas apoiado em molas que geram o efeito de vibração. Durante o vibro adensamento das peças, a mesa apresentou bom comportamento, sendo visível a saída de ar e água da massa fresca, com tempos de vibração que variaram de 3 a 5 minutos. Esse tempo máximo de vibração foi estabelecido, visto que uma vibração em tempos excessivos causaria no concreto uma separação de seus elementos. A aparência final dos blocos na mesa foi de uma massa homogênea e condizente com o método, reduzindo a porosidade e deixando a massa mais densa, tendo como consequência um aumento na resistência mecânica desse material. A acomodação do concreto nas formas plásticas também foi melhorada com a vibração mecânica na mesa.



Figura 9 – Confeção de mesa vibratória elétrica

5.3 Escolha do traço inicial, dosagem e resultados de RCS

O programa experimental seguiu com a escolha ou cálculo de uma sucessão de misturas (traços) que visam o alcance da resistência exigido em norma e o maior número de uso dos resíduos, onde um equilíbrio entre o consumo baixo de cimento também foi objetivado. O primeiro traço confeccionado foi o sugerido por Fernandes (2013) para concretos vibro prensados utilizado na produção de pavimentos intertravados conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Traço usual adotado para produção dos pavimentos intertravados (Fernandes, 2013)

| MATERIAIS | TRAÇO (proporção em massa) |
|----------------------------|----------------------------|
| Cimento | 1 |
| Areia | 0,77 |
| Pó de pedra | 2,33 |
| Pedrisco (9 mm) | 1,11 |
| Relação água/cimento (a/c) | 0,43 |



Figura 10 – Preparação da mistura

Foram dosados 2 traços, o traço MI1 substituindo totalmente os agregados pelo rejeito de quartzito e outro com os materiais convencionais (MI2). As proporções em quilogramas estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Proporções em quilogramas de traço inicial para moldagem

| Traço | Cim. | Areia | Resíduo (P1) | Brita (9mm) | Resíduo (Q1 moído) | Resíduo (Q1 9mm) | Pó de Brita | Água |
|-------|------|-------|-----------------|----------------|-----------------------|------------------------|----------------|------|
| MI1 | 6 | - | 13,98 | - | 4,62 | 6,66 | - | 2,58 |
| MI2 | 6 | 4,62 | - | 6,66 | - | - | 13,98 | 2,58 |



Figura 11 – Moldagem e rompimento de blocos de concreto

Na Figura 12 encontram-se os resultados referentes ao ensaio de determinação de resistência à compressão.

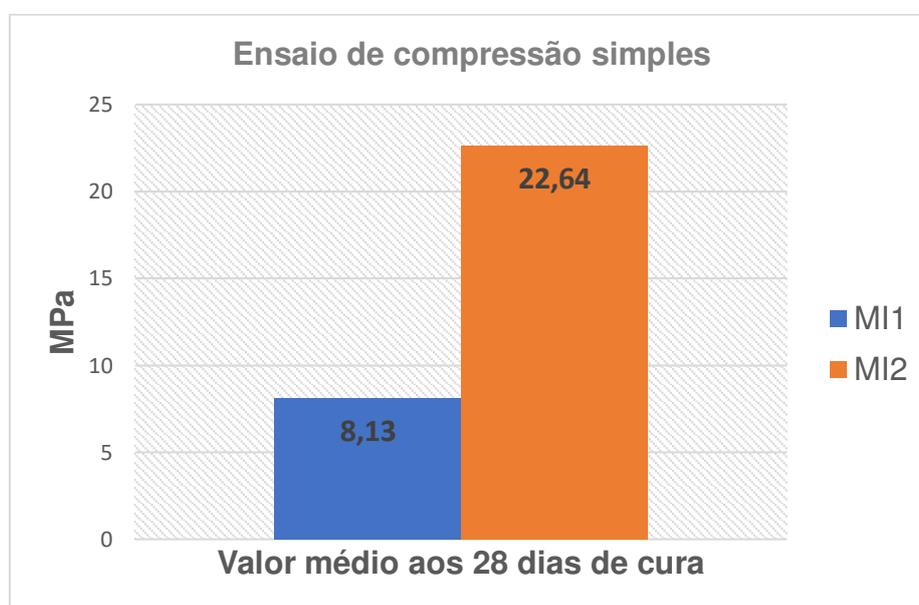


Figura 12 – Resultados de resistência à compressão iniciais

Analisando a Figura 12, percebe-se que o traço escolhido não obteve a resistência desejada de no mínimo 25 Mpa e mostrou que a substituição completa dos agregados convencionais pode não ser a melhor opção para esse bloco, visto que a resistência à compressão teve uma perda de 64% em relação aos blocos com materiais convencionais de mesmo traço, inutilizando o produto para uso. O resultado também mostra que a presença em alta quantidade de pó de pedra não é uma boa opção para o bloco e será diminuída em relação à quantidade total de agregado miúdo (pó + areia). Por esse motivo, não se variaram as composições para o traço escolhido.

O experimento seguiu com a utilização do método de dosagem do concreto de Mehta (2008) para cálculo de um novo traço em busca de melhores resultados. Uma rotina computacional para utilização desse método se encontra no Apêndice desse trabalho e foi programada no Software Mathcad. O traço foi calculado a partir de uma série de ensaios, que são: análise granulométrica dos materiais convencionais e resíduos, ensaio para determinação da massa unitária dos agregados convencionais, cálculo de módulo de finura, dimensão máxima do agregado e estimativa da massa específica do concreto no estado fresco, apresentados anteriormente. O resultado do cálculo do traço está apresentado na Tabela 10. A rotina para o cálculo desse traço também é apresentada no Apêndice desse trabalho, no formato do Software Mathcad.

Tabela 10 – Traço calculado pelo método de Mehta (2008) - Apêndice

| MATERIAIS | TRAÇO (proporção em massa) |
|----------------------------|----------------------------|
| Cimento | 1 |
| Areia | 2,08 |
| Pó de pedra | - |
| Pedrisco | 1,32 |
| Relação água/cimento (a/c) | 0,44 |

A partir desse traço, 6 composições foram definidas para testes. As composições dos traços convencionais e alternativos, em massa, estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Composições dos traços convencionais e alternativos incorporados com resíduos de quartzitos em quilogramas.

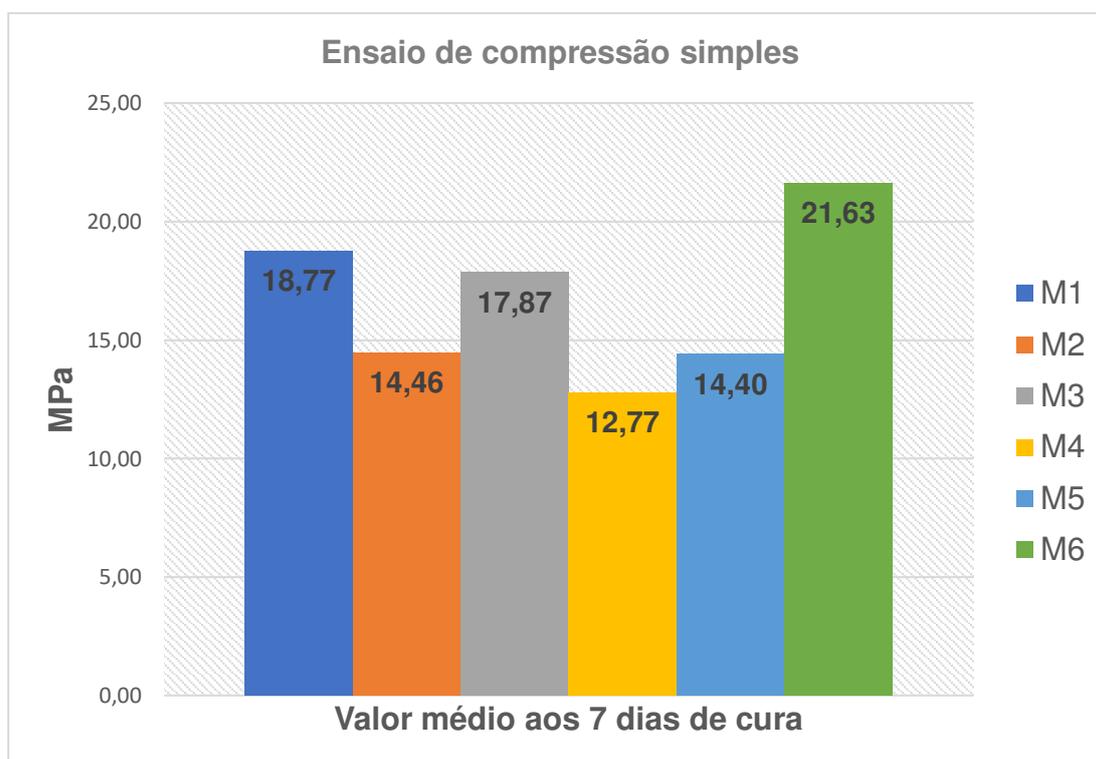
| Com p. | Cim. | Areia | Resíduo (P1) | Brita (9mm) | Resíduo (Q1 moído) | Resíduo (Q1 9mm) |
|------------|------|-------|--------------|-------------|--------------------|------------------|
| M1 | 6 | 12,48 | - | 7,92 | - | - |
| M2 | 6 | - | - | 7,92 | 12,48 | - |
| M3 | 6 | 12,48 | - | - | - | 7,92 |
| M4 | 6 | - | - | - | 12,48 | 7,92 |
| M5* | 6 | - | 1,24 | - | 11,23 | 7,92 |
| M6* | 6 | 11,23 | 1,24 | 7,92 | - | - |

M5* Substituição da areia e brita da composição M1, sendo a areia 10% P1 e 90% Q1

M6 * Composição conforme M1, sendo a areia 10% P1 e 90% areia convencional

- Ausente

Na Figura 13 encontram-se os resultados referentes ao ensaio de determinação de resistência à compressão dessas composições.



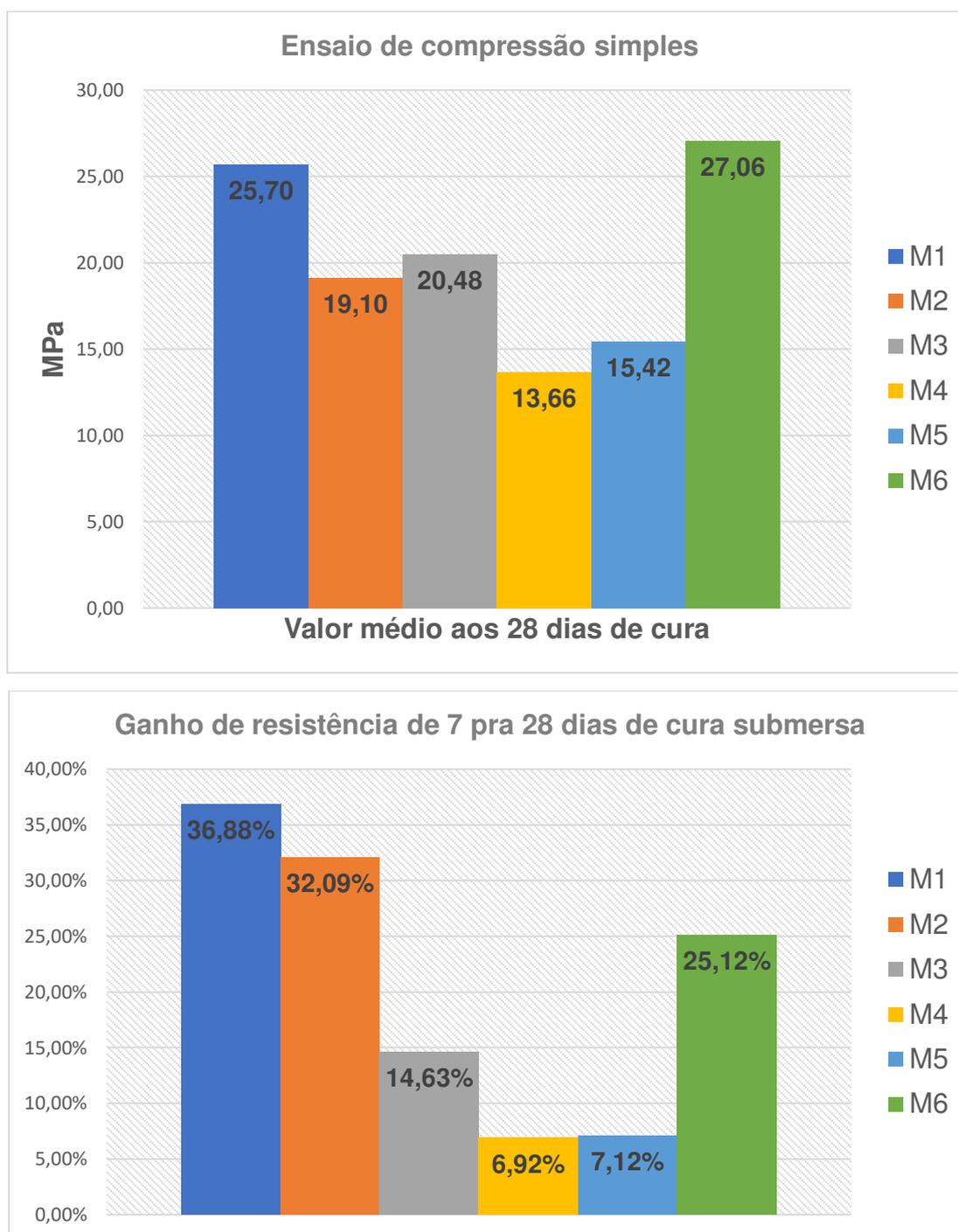


Figura 13 – Resultados de resistência à compressão

Estes resultados da Figura 13 são semelhantes aos da literatura sobre a incorporação de resíduos oriundos da extração e do beneficiamento de rochas ornamentais em argamassas e concretos. Marmol et al., (2010), incorporou até 20% de resíduos de granito em argamassa, e alcançou uma resistência à compressão simples mínima de 2 MPa e máxima de 5 MPa após 28 dias de cura, concluindo-se

que o nível ótimo de incorporação dos resíduos de granito seria de 10%. Corinaldesi et al. (2010) também alcançaram resultados parecidos ao incorporarem resíduos de mármore em argamassa, substituindo 10% de areia por resíduos de pó de mármore e obtiveram valores de resistência à compressão simples após 28 dias de cura mais elevados que 2 Mpa, mas utilizando superplastificante na mistura. Na literatura é raramente observada estudos que substituíram 100% do agregado natural por resíduos. Nos estudos acima mencionados foram observados apenas uma substituição parcial agregado natural. Enquanto, no presente trabalho, grandes quantidades de resíduos de quartzito foram incorporados em composições de argamassa substituindo totalmente o agregado natural e se alcançou valores superiores a 20 Mpa para resistência à compressão simples sem uso de superplastificantes.

Na Tabela 12 estão contidos os valores de absorção de água de amassamento, fator de água aglomerante e resistência à compressão simples dos traços convencionais e incorporados com resíduos.

Tabela 12 - Fator de água aglomerante, absorção de água de amassamento e resistência à compressão simples dos traços convencionais e alternativos.

| Comp. | Água inicial (kg) | Relação a/c | Água de amassamento (kg) | Relação a/c corrigida | RCS Mpa |
|--------------|--------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------|
| M1 | 2,64 | 0,44 | 0,46 | 0,52 | 25,696 |
| M2 | 2,64 | 0,44 | 0,56 | 0,53 | 19,099 |
| M3 | 2,64 | 0,44 | 0,46 | 0,52 | 20,478 |
| M4 | 2,64 | 0,44 | 1,16 | 0,63 | 13,659 |
| M5 | 2,64 | 0,44 | 0,86 | 0,58 | 15,424 |
| M6 | 2,64 | 0,44 | 0,2 | 0,47 | 27,058 |

Observando os valores da Tabela 12, verifica-se que a incorporação de quartzito provoca uma constância da absorção da água nos concretos em todos os casos analisados. Este fenômeno ocorreu devido à ausência de interação química entre o resíduo e a matriz cimentícia, gerando aumento da porosidade do concreto e, por conseguinte, o aumento da absorção de água conforme o aumento do fator

água/cimento. Este fato deve-se ao volume de vazios originários do excesso de água. Estudos anteriores apontaram que os concretos contendo teores de resíduos, nos níveis de substituição de 5% e 10%, não apresentaram variação significativa na absorção de água (Saika e Brito, 2013).

A capacidade de absorção de água dos concretos com teor de 15% foi superior ao obtido para o concreto de referência. Se a quantidade de água utilizada for inferior à necessária não ocorrerá a hidratação completa do cimento. No entanto, se a quantidade de água for maior do que a necessária, após ocorrida toda a hidratação do cimento, a água excedente migra para a superfície do concreto, formando capilares em seu interior. As duas situações provocam perda da resistência mecânica. A absorção de água fornece uma medida de durabilidade das peças porque indiretamente aponta o volume de vazios existentes e, com isso, sua permeabilidade (Lintz *et al.*, 2012). Diminuindo a permeabilidade da peça, conseqüentemente ocorrerá o aumento da sua resistência ao processo de eflorescência.

Em relação à resistência de compressão simples (Tabela 12), observa-se um acréscimo nos valores de RCS em relação ao adicionamento do resíduo do pó da serra em pequenas quantidades, o mesmo não acontece ao se substituir em totalidade um agregado pelas aparas de quartzito britadas. É observado que a resistência do concreto é proveniente da resistência mecânica do agregado, e, também, da sua absorção e da sua aderência. Os agregados utilizados nessa pesquisa, apresentaram resistência maior quando substituídos em pequenas porcentagens ao agregado miúdo que era constituído de areia quartzosa. Há uma perda de resistência quando um agregado convencional é substituído em sua totalidade pelo quartzito. Outra fonte de enfraquecimento vem do fato de que o agregado pode conter falhas em sua estrutura, além de ser causador de micro fissuração na interface com a pasta de cimento. (Metha, 2008)

5.4 Considerações sobre a resistência à compressão obtida nas peças

A norma brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013) exige uma resistência à compressão de 35 MPa e em nenhum dos traços moldados essa resistência foi atendida. É provável que essa resistência teria sido atingida ao se testar outros tipos de cimento na composição ou outros traços e usando aditivos plastificantes na mistura

para diminuição do fator a/c e água livre. Vale ressaltar que o cimento CP II foi escolhido por ser um cimento mais versátil nas construções e facilmente encontrado no mercado. A norma técnica NBR 9781 (ABNT, 2013) diz que essa resistência é exigida para pavimentos com tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, porém não define um valor para o caso de pavimentos apenas com tráfego constante de pedestres, ou mesmo em pavimentos internos nas construções ou calçadas de contorno com pouco movimento, deixando a entender que nesses casos a resistência exigida poderia ser menor. Na ausência desses dados, pode-se analisar normas internacionais a fim de se obter uma resistência aceitável para esses tipos de pavimentos.

A norma americana ASTM C-902 (2011), exige uma resistência à compressão simples de 20,7 Mpa para o caso de pavimentos com tráfego leve, com blocos sem efeitos de temperaturas muito baixas. Essa norma reforça ainda mais o fato de que os blocos das composições M1, M3 (com alguma melhora no fator a/c) e M6 poderiam ser utilizados em calçados com tráfego apenas de pedestres.

6 CONCLUSÃO

Após estudos com resíduos de quartzitos para uso em pavimentos intertravados, pôde-se concluir que:

- A caracterização física-mineralógica dos resíduos de quartzitos apresentou propriedades adequadas para uso em blocos de concreto de pavimentos intertravados;
- A caracterização ambiental classificou os resíduos como perigosos, de acordo com as normas da ABNT;
- Os blocos incorporados com resíduos de quartzito apresentaram resistência à compressão simples superior de 20 MPa, sendo o traço da mistura M6 a que obteve o melhor resultado;
- Os blocos incorporados com resíduos de quartzito apresentaram resistência mecânica inferior às especificadas na norma ABNT, que é de 35 Mpa para pavimentos com tráfego de veículos leves;
- Os blocos incorporados com resíduos de quartzitos apresentaram comportamento mecânico adequado para serem utilizadas em calçadas de tráfego de pedestres de acordo com as normas ASTM;
- O comportamento mecânico dos blocos incorporados com resíduos de quartzitos poderá ser elevado com a inclusão de aditivo plastificante para diminuição da água de amassamento adicionada nas misturas.

Portanto, a incorporação de resíduo de quartzito em blocos de pavimento intertravado é uma alternativa para diminuir a poluição do meio ambiente e conservar os recursos minerais. Há uma perda de resistência considerável quando é feita a substituição total dos agregados nas peças, comprometendo o seu uso. Os melhores resultados foram obtidos na substituição parcial dos agregados.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência na resistência à compressão dos blocos com materiais reciclados produzidos com aditivos plastificantes na sua dosagem;
- Analisar as propriedades de absorção de água e resistência à abrasão exigidas na NBR 9781 (ABNT, 2013);
- Variar as composições dos blocos com menos porcentagem de quartzito, visando maximizar o uso dos resíduos mantendo ou aumentando a resistência à compressão das peças.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS. Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2017. Informe 01/2018. 2018. <Disponível em http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/4062/Informe_01_2017.pdf>.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. ABNT, 1997.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15953**: Pavimento intertravado com peças de concreto - Execução. ABNT, 2011.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. ABNT, 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção extrato de lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248**: Determinação de composição granulométrica dos agregados. Rio de Janeiro, 2001.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM C-902**: Specification for Pedestrian and Light Traffic Paving. ASTM International, 2001a.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM C-936 / C936M**: Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units. ASTM International, 2015.

ANDRÉ, A.; BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D., Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste, **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 389-396, 2014.

BABISK, M. P.; VIDAL, F. W. H.; RIBEIRO, W. S.; AGUIAR, M. C.; GADIOLI, M. C. B.; VIEIRA, C. M. F. Incorporação de resíduo de quartzitos em cerâmica vermelha. **HOLOS**, v. 6, p. 169-177, 2012.

BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B; FIGUEIREDO, E. P.; LOPES, J. L. M. P., Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers, **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1-10, 2013.

BARROS, S. V. A.; MARCIANO, J. E. A.; FERREIRA, H. C.; MENEZES, R. R.; DE ARAÚJO NEVES, G. Addition of quartzite residues on mortars: Analysis of the alkali aggregate reaction and the mechanical behavior. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 344-351, 2016.

BEATY, A.N.S. RAYMOND, G.P. Concrete block road paving. **Concrete International**. v.17, n. 5, p. 36-41. Michigan, EUA. 2005.

BEZERRA, M. S. Relatório Técnico do Perfil do Setor mineral do Nordeste e análise das possibilidades de incremento da atividade mineral na região. **Ministério de Minas e Energia**, Nº 81, 65p., 2009.

Borges, P. H. R., de Figueiredo Lourenço, T. M., Foureaux, A. F. S., & Pacheco, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14(2), p. 153-168, 2014.

CABELLO, M. L.; PERES, A. E.; MARTINS, A. H.; PEREIRA, C. A. Use of Quartzite Quarries Wastes in Civil Construction. **Key Engineering Materials, Trans Tech Publ**, p.135-140, 2013.

Carreiro, M. E. A., Santos, R. C., Silva, V. J., Lira, H. L., Neves, G. A., Menezes, R. R., Santana, L. N. L. C. Resíduo de quartzito - matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural. **Revista Cerâmica**, v. 62, p. 170-178, 2016.

COSTA, A. G.; CAMPELLO, M. S.; PIMENTA, V. B. Rochas ornamentais e de revestimento de Minas Gerais: Principais ocorrências, caracterização e aplicações na indústria da construção civil. **Revista Geonomos**, v. 8, n. 1, 2000.

ÇAKIR, Ö. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 17-25, 2014.

Farias Filho, J., Menezes, R. R., Ferreira, H. S., Santana, L. N. L., Neves, G. A & Ferreira, H. C. Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos. **Revista Cerâmica**, v. 57, p. 395-403, 2011.

Fernandes, T. M. G., Godoy, A. M., & Fernandes, N. H. Aspectos geológicos e tecnológicos dos quartzitos do centro produtor de Sao Thomé das Letras (MG). **Geociências**, v. 22(2), p. 129-141, 2003.

Fernandes, F. R. C., Enríquez, M. A. R. D. S., & Alamino, R. D. C. J. Recursos minerais & sustentabilidade territorial: arranjos produtivos locais. **CETEM**, 2011.

FERNANDES, I. D. **Blocos e Pavers – Produção e Controle de Qualidade**, v 4. Ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2013. ISBN 9788562290039.

GABR, A.; MILLS, K.; CAMERON, D. Repeated load triaxial testing of recycled concrete aggregate for pavement base construction. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 31, n. 1, p. 119-132, 2013.

GENCEL, O.; OZEL, C.; KOKSAL, F.; ERDOGMUS, E.; MARTÍNEZ-BARRERA, G.; BROSTOW, W. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**, v. 21, n. 1, p. 62-70, 2012.

GERVEN, T. VAN; BAELEN, D. VAN; DUTRÉ, V.; VANDECASTEELE, C., Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 149 -156, 2004.

Gholampour, A., Gandomi, A. H., & Ozbakkaloglu, T. New formulations for mechanical properties of recycled aggregate concrete using gene expression programming. **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 122-145, 2017.

Gomes, R. L.; Rodrigues, J. E. Sistema de avaliação de materiais rochosos para uso como agregados. **Geociências**, v.19, n.1, p.81-91. 2000.

HALLACK, A. Pavimento intertravado: uma solução universal. **Revista Prisma**, v. 1, p. 25-27, 2001.

Hoppen, C., Portella, K. F., Joukoski, A., Trindade, E. M., & Andreóli, C. V. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental. **Química Nova**, v. 29(1), p. 79, 2006.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2019.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre-Rio Grande do Sul.

LINTZ, R. C. C., JACINTHO, A. E. P. G. A., PIMENTEL, L. L., Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 166-181, 2012.

MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRIA, M.; PAVÓN, E.; DÍAZ, N. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 384-392, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª Edição**. São Paulo: IBRACON, 2008. ISBN 8598576212.

MOURA, W. A., LEITE, M. B., Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Esc. Minas**, v. 64, p. 147-154, 2011.

MÜLLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2015. 234f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ. Rio de Janeiro-RJ.

MUDIYONO, R. The effect of paver joint width on the construction of concrete block pavement on sloping road section. **Journal UNISSULA**. Indonésia. 2015.

Neto, S. F., Silva, T. T. S., Dos Santos, J. S. Impactos ambientais causados pela disposição final de rejeitos provindos da mineração de quartzito na paraíba. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC, 2015. Fortaleza-CE, 2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de: GIAMMUSSO, S. E. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. ISBN 9788582603659.

Omary, S., Ghorbel, E., & Wardeh, G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 163-174, 2016.

PONTES, I. F., CARDOSO, F. W. H. Valorização de Resíduos de Serrarias de Mármore e Granito e sua Aplicação na Construção Civil. V Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste (CETEM 2005). Rio de Janeiro, 2005.

RUSSO, M. L. C. **Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração de Quartzito**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG. Belo Horizonte – MG.

SAIKIA, N., BRITO, J. Waste polyethylene terephthalate as naaggregate in concrete. **Materials Research**, v.16. 2013.

Santos, R. A., Lira, B. B., & Ribeiro, A. C. M. Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito. **HOLOS**, v. 5, 2012.

SANTOS, D. A., GURGEL, M. T., MOTA, A. F., PAIVA, F. Extração mineral de quartzito e sua aplicabilidade na construção civil na cidade de Várzea–PB. **HOLOS**, v. 4, 2014.

SILVA, F. M., SANTOS, V. R. F., RIBEIRO, L. C. L., PIRES, M. S. G., LINTZ, R. C. C., GACHET-BARBOSA, L. A. Interlocking tactile concrete paver with addition of steel fibers. **Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ**, p.253-256, 2014.

SILVA, R.; DE BRITO, J.; DHIR, R. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, 2014.

Silva, F. M., Barbosa, L. A. G., Lintz, R. C. C., & Jacintho, A. E. P. Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 71-79, 2015.

SOUZA, A. P. F., LIMA, A. D. A., GOPIMATH, T. R., NADLER, H. C. S. **Uma abordagem técnica e ambiental sobre os depósitos de quartzitos no estado da Paraíba**. CETEM/MCTI, 2002. ISBN 8572271627.

SOUZA, J. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz**. 2008. 161f. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande-Paraíba.

TENNICH, M., KALLEL, A., OUEZDOU, M. B. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 65 -67, 2015.

TORRES, P., MANJATE, R. S., QUARESMA, S., FERNANDES, H. R., FERREIRA, J. M. F. Development of ceramic floor tile compositions based on quartzite and granite sludges. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n. 16, p. 4649-4655, 2007.

TORRES, P., FERNANDES, H. R., OLHERO, S., FERREIRA, J. M. F. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 29, p. 23-30, 2009.

TUFAIL, M., SHAHZADA, K., GENCTURK, B., WEI, J. Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties of Limestone, Quartzite and Granite Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 11, n. 1, p. 17-28, 2017.

US EPA. **TCPL 1311**: test methods for evaluating solid waste, toxicity characteristics leaching procedure. Physical/Chemical methods. SW-846, 1992.

VIDAL, F. W. H., CAMPOS, A. R. D., CORREIA, J. C. G. Quartzito de Várzea do Seridó - PB: Tecnologia de Lavra e de Beneficiamento. **SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL**, v. 93, 2015.

VIJAYALAKSHMI, M., SEKAR, A. S. S., GANESH PRABHU, G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. **Construction and Building Materials**, v.46, p.1-7, 2013.

APÊNDICE

Rotina computacional para o cálculo do traço simples do concreto de blocos de pavimentos intertravados baseado no método de Mehta (2008) em Mathcad. por Clóvis Júnior

Resultados dos ensaios (entrada de dados):

Dimensões máximas (correspondente à abertura nominal, em milímetros, 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.

| | | | |
|-------------------------|-----------------------|-------|----------------------------------|
| Dimensão máxima da | $D_{maxareia} := 1.2$ | (mm) | |
| Dimensão máxima da | $D_{maxbrita} := 4.8$ | (mm) | |
| Resistência dos blocos: | $Rest := 38$ | (Mpa) | Valores: 40, 38, 35, 30 ou 25 |

Módulo de finura da areia: $MF_{areia} := 2.725$ (adimensional)

Módulo de finura da brita: $MF_{brita} := 5.667$ (adimensional)

Massa unitária do agregado $M_{unitaria} := 1323$ (Kg/m³)

Cálculo do traço:

$$Consumo_{agua} := \begin{cases} \text{if } D_{maxbrita} \leq 9. \\ \quad || 207 \\ \text{else} \\ \quad || 199 \end{cases} \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$\begin{array}{l}
 \text{aguacimento} := \text{if } Rest = 40 \\
 \quad \parallel 0.42 \\
 \text{also if } Rest = 38 \\
 \quad \parallel 0.44 \\
 \text{also if } Rest = 35 \\
 \quad \parallel 0.47 \\
 \text{also if } Rest = 30 \\
 \quad \parallel 0.54 \\
 \text{else} \\
 \quad \parallel 0.61
 \end{array} \quad \text{(dimensional)}$$

$$\text{Consumocimento} := \text{Consumoagua} \div \text{aguacimento}$$

$$\text{MFa} := \text{round}(\text{MFareia}, 1) \quad \text{MFa} = 2.7$$

$$\text{TabelaAgregados} := \begin{bmatrix} 0.5 & 0.49 & 0.48 & 0.47 & 0.46 & 0.45 & 0.4 \\ 0.59 & 0.58 & 0.57 & 0.56 & 0.55 & 0.54 & 0.53 \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{linhaT} := \text{if } D_{\text{maxbrita}} \leq 9.5 \quad \text{colunaT} := \text{MFa} \cdot 10 - 23 \\
 \quad \parallel 1 \\
 \text{else} \\
 \quad \parallel 2
 \end{array} \quad \text{linhaT} = 1$$

$$\text{Consumoagregadograudo} := \text{TabelaAgregados}_{\text{linhaT}, \text{colunaT}} \cdot \text{Munitaria}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Massaestimadaconcreto} := \text{if } D_{\text{maxbrita}} \leq 9.5 \\
 \quad \parallel 2280 \\
 \text{else} \\
 \quad \parallel 2310
 \end{array} \quad \text{(Kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{MEC} := \text{Massaestimadaconcreto} \quad \text{CAG} := \text{Consumoagregadograudo}$$

$$\text{CA} := \text{Consumoagua} \quad \text{CC} := \text{Consumocimento}$$

$$\text{Consumoareia} := \text{MEC} - \text{CA} - \text{CC} - \text{CAG}$$

$$\text{CAM} := \text{Consumoareia}$$

$$i := 1..4 \quad \text{traco} := \left[\frac{\text{CC}}{\text{CC}} \text{ round} \left(\frac{\text{CAM}}{\text{CC}}, 2 \right) \text{ round} \left(\frac{\text{CAG}}{\text{CC}}, 2 \right) \text{ round} \left(\frac{\text{CA}}{\text{CC}}, 2 \right) \right]$$

Resultado do Traço:

$$\begin{array}{l}
 \text{cimento - areia - brita -} \\
 \text{traco} = [1 \ 2.08 \ 1.32 \ 0.44]
 \end{array}$$