

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS E TOTAIS DOS AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS POR AGREGADOS RECICLADOS

Vinicius Marcos Ugioni (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
vini_ugioni@hotmail.com (1) dss.engcivil@gmail.com (2)

RESUMO

Nos dias atuais devido ao consumo desordenado, o grande volume de resíduos gerados e a escassez de materiais, buscas por alternativa sustentáveis são cada vez mais frequentes. Dentro deste contexto se inserem os resíduos provenientes da construção civil, que por sua vez apresenta porcentagens expressivas na produção de resíduos. Transformar estes resíduos em uma nova fonte de matéria prima dentro do próprio meio da construção civil se tornou um desafio. No sentido de incorporar os resíduos da construção em novos materiais, o presente estudo tem por objetivo determinar traços de concreto para a possível utilização de RCD (Resíduos de Construção e Demolição), com substituição parcial e total dos agregados graúdos e miúdos naturais, por agregados de origem reciclada, nas proporções de 30 %, 60 % e 100 %, de modo a atender as resistências indicadas nas classes I e III da NBR 6118:2014. Para tal fim foram produzidos 216 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm, divididos em oito traços. Após a realização das moldagens dos corpos de prova, foram realizados os estudos das caracterizações mecânicas, físicas e químicas do concreto moldado com diferentes teores de RCD. Realizar ensaios como o de Resistência à Compressão Axial, Tração por Compressão Diametral, Módulo de Elasticidade, determinação da Massa Específica do concreto, Índice de Vazios, Absorção de Água, Microscopia, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difratomia (Difração) de Raios X (DRX), Fluorescência de Raios X (FRX) e Análise Térmica (TGA/DSC). De acordo com os resultados obtidos, observou-se que alguns traços em um primeiro instante, os concretos com adição de agregados reciclados se aproximaram e até mesmo igualaram as características mecânicas dos respectivos concretos de referência. Os resultados obtidos permitem afirmar que concretos reciclados podem ser usados para diversos fins, porém com algumas restrições.

Palavras-chave: Concreto, Resíduos da Construção Civil, Agregados Reciclados.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil representa percentuais expressivos na produção de resíduos sólidos, gerando assim grandes impactos ambientais. Com o crescimento desta área de atuação, o setor de gerenciamento dos resíduos sólidos, se depara com o grande desafio de conciliar sua atividade produtiva e lucrativa com o desenvolvimento sustentável consciente. Estudos demonstram que 40 % a 70 % da massa dos resíduos urbanos são gerados em canteiros de obras (BLUMENSCHHEIN, 2007). Para Patto (2006), a principal contribuição é mostrar que a reciclagem dos resíduos de construção e demolição podem auxiliar na produção de materiais de baixo custo, colaborando para a construção de habitações mais econômicas.

A reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil, além de proporcionar melhorias significativas do ponto de vista ambiental pode disponibilizar ao mercado um novo material com grande potencialidade de uso, transformando esses resíduos, novamente, em matéria-prima.

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) nº 307, Art. 2º Inciso IV, o agregado reciclado é definido como:

“material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia”.

A reutilização de RCD além de buscar um destino melhor aos resíduos sólidos provenientes da construção civil também busca reduzir o intenso consumo dos recursos naturais, que apesar de abundantes devem ser conservados.

Segundo Blumenschein (2007), uma gestão adequada dos resíduos popularmente chamados de “entulho”, pode reduzir custos sociais, financeiros e ambientais. Os “entulhos” gerados em obras ou demolições devem ser gerenciados do projeto à sua destinação final, para que impactos ambientais sejam evitados.

Diante deste cenário, o presente estudo tem por objetivo determinar os traços de concreto para a possível utilização de RCD (Resíduos de Construção e Demolição), com substituição parcial e total dos agregados graúdos e miúdos naturais, nas proporções de 30 %, 60 % e 100 %, de modo a atender as resistências indicadas nas classes I e III da NBR 6118:2014.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção dos concretos neste trabalho foram o cimento Portland do tipo CP IV 32, agregados miúdos e graúdos reciclados já triturados, água, agregados graúdos e miúdos naturais e o aditivo hiperplastificante Tec-Flow 8000 para concreto.

2.1.1 Dosagens

O estudo efetuado se baseia em oito tipos de misturas, para se obter duas resistências diferentes, com o propósito de analisar os comportamentos de diferentes dosagens dos agregados reciclados, sendo uma das dosagens usada como referência (sem uso de materiais reciclados) e as demais dosagens foram distribuídas em 30 %, 60 % e 100 %, substituindo os agregados naturais por agregados reciclados. Para este estudo adotou-se um teor de argamassa de 55 % e após vários testes pilotos, obteve-se as dosagens desejadas conforme especificado na Tabela 01.

Tabela 01 - Traços de concreto produzidos

CONCRETO 30 Mpa	Cimento	Areia Natural	Areia Reciclada	Brita Natural	Brita Reciclada	a/c	Aditivo (%)	Abat (cm)
Amostra 01 - Referência	1,00	3,13	-	3,38	-	0,570	-	10
Amostra 03 - 30 % de Agr. Rec.	1,00	2,00	0,86	2,21	0,95	0,568	2 %	-
Amostra 05 - 60 % de Agr. Rec.	1,00	0,74	1,12	0,94	1,40	0,573	2 %	-
Amostra 07 - 100 % de Agr. Rec.	1,00	-	0,93	-	1,58	0,521	2 %	-
CONCRETO 20 Mpa	Cimento	Areia Natural	Areia Reciclada	Brita Natural	Brita Reciclada	a/c	Aditivo (%)	Abat (cm)
Amostra 02 - Referência	1,00	3,68	-	3,83	-	0,650	-	9
Amostra 04 - 30 % de Agr. Rec.	1,00	2,38	1,02	2,52	1,08	0,681	2 %	-
Amostra 06 - 60 % de Agr. Rec.	1,00	1,36	2,04	1,44	2,16	0,910	2 %	-
Amostra 08 - 100 % de Agr. Rec.	1,00	-	2,58	-	2,93	0,994	2 %	-

Fonte: Autor, 2017.

2.1.2 Agregados Miúdos e Graúdos Reciclados

Os agregados reciclados utilizados nesse estudo foram fornecidos pela usina de reciclagem 3R's Reciclagem de Resíduos da Construção Civil Ltda – Me. Os agregados reciclados são do tipo classe A, (CONAMA nº 307, Art. 3º Inciso I).

A Figura 01 demonstra os agregados reciclados e agregados naturais utilizados na produção do concreto.

Figura 01 - (A) Agregado graúdo reciclado, (B) Agregado graúdo natural, (C) Agregado miúdo reciclado e (D) Agregado miúdo natural.



Fonte: Autor, 2017.

2.2 MÉTODOS

Os corpos de prova foram moldados nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IDT/UNESC, após 24 horas de repouso, foram desmoldados, identificados e colocados submersos em um tanque com água não corrente, a fim de evitar retração e ficaram por um período de cura de 28 e 90 dias.

Os corpos de prova foram dimensionados com formato cilíndrico de 10 x 20 cm, e foram moldados de acordo com a NBR 5738/2015. Após o período de cura, os corpos de prova foram retirados do tanque e seguiram para os ensaios previstos.

2.2.1 Caracterização dos Agregados

2.2.1.1 Composição Granulométrica

Este ensaio tem por objetivo, determinar a composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos, bem como conhecer o módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados.

O ensaio referente à composição granulométrica dos agregados foi realizado de acordo com a norma NBR NM 248/2003.

2.2.1.2 Massa Unitária e volume de Vazios

Esse ensaio tem por objetivo determinar a massa unitária e o volume de vazios dos agregados, seguiu-se a NBR NM 45/2006.

2.2.1.3 Material Pulverulento

O ensaio de material pulverulento basicamente define o teor de material fino presente na amostra destinada ao preparo do concreto.

Para o ensaio referente ao material pulverulento dos agregados seguiu-se a norma NBR NM 46/2003.

2.2.1.4 Massa Específica

Esse ensaio tem por objetivo determinar a massa específica do agregado miúdo e agregado graúdo e foi realizado de acordo com a NBR NM 52/2009 e NBR NM 53/2009 respectivamente.

2.2.2 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência compressão axial foi realizado de acordo com a NBR 5739/2007. O procedimento se dá pela aplicação de uma força axial aplicada ao corpo de prova foi fixado entre os eixos da prensa na posição vertical, executada por uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC 200, com capacidade máxima de 2000 KN.

2.2.3 Resistência a Tração por Compressão Diametral

Para a realização deste ensaio utilizou-se a prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC 200, com capacidade máxima de 2000 KN. O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a NBR 7222/2011. Os

procedimentos e quantitativos de amostras foram os mesmos realizados no ensaio de compressão axial, porém neste ensaio o corpo de prova foi fixado entre os eixos da prensa na posição horizontal com o auxílio de anteparos próprios da mesma e o uso de taliscas de madeira que além de ajudar na fixação, também servem para efetuar a distribuição uniforme da carga.

2.2.4 Módulo de Elasticidade

Para o ensaio foi utilizado 30 % da tensão da carga de ruptura do ensaio de compressão axial. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 8522/2008.

Utilizou-se a prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC 200 CS, com capacidade máxima de 2000 KN. Para este ensaio foram utilizados ainda extensômetros eletrônicos cuidadosamente fixados ao corpo de prova com a ajuda de um cordão elástico, posicionados a 5,0 cm das extremidades do mesmo. Estes extensômetros têm por finalidade fazer a medição das pequenas deformações sofridas pelo corpo de prova.

2.2.5 Massa Específica, Índice de Vazios e Absorção de Água

Este ensaio tem como objetivo a determinação de absorção de água, do índice de vazios e da massa específica do concreto endurecido. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9778/2009.

2.2.6 Microscopia

A realização deste ensaio foi efetuada com o auxílio do microscópio Olympus, modelo BX41M-LED. O objetivo deste ensaio foi identificar e fazer uma análise dos compostos e produtos gerados no concreto com adição de agregados reciclados.

As amostras para a realização deste ensaio foram retiradas dos corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm), sendo estas cortadas com o auxílio de um equipamento de precisão (ISOMET 1000), logo após foram lixadas e polidas. A análise da microscopia foi realizada no Laboratório de Metalografia e Microscopia do IDT/UNESC.

2.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é um ensaio realizado por um microscópio eletrônico capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. A realização deste ensaio foi efetuada com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura ZEISS, modelo MA10.

O objetivo deste ensaio foi identificar e fazer uma análise dos compostos e produtos gerados no concreto com adição de agregados reciclados.

As amostras para a realização deste ensaio foram retiradas dos corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm), sendo estas cortadas com o auxílio de um equipamento de precisão (ISOMET 1000), logo após foram lixadas e polidas de forma a criar uma superfície lisa. As amostras a serem utilizadas no ensaio permaneceram em estufa a 105° C, até constância de massa. A análise do MEV foi realizada no Laboratório de Cerâmica Técnica do IDT/UNESC.

2.2.8 Fluorescência de Raios x (FRX)

A análise de Fluorescência de Raios X (FRX) é um método de análise qualitativa e quantitativa da composição dos elementos da amostra, pela excitação de átomos e detecção de seus raios X característicos (BRUKER, 2016). O objetivo deste ensaio foi identificar composição química dos materiais. A análise foi realizada em um equipamento da marca Panalytical, modelo WRFDX AXIOS MAX, no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais – LDCM/SENAI.

2.2.9 DIFRATOMETRIA (DIFRAÇÃO) DE RAIOS (DRX)

A Difratometria (Difração) de Raios X (DRX) teve como objetivo identificar as fases cristalinas presentes na amostra, através de picos gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral. O resultado da análise foi apresentado em forma de gráfico, cujas variáveis são o ângulo 2θ (eixo horizontal) e a intensidade dos picos difratados (eixo vertical). Para realização do ensaio as amostras dos corpos de prova foram fragmentadas através de um britador de mandíbula, moídas em do moinho de esferas (moinho de periquito) e peneiradas (peneira 200 μm), obtendo-se um material fino. A análise por DRX foi realizada no

Laboratório de Caracterização de Materiais do IDT/UNESC, no equipamento SHIMADZU LAB X modelo XRD-6000, ângulo de varredura de 3 a 80 ° em 2 θ e velocidade de 2 °/min. Equação 04 demonstra a fórmula utilizada para o cálculo.

2.2.10 Análise Térmica (TGA-DSC)

A análise Calorimétrica Diferencial de Varredura (DSC) avalia o comportamento exotérmico e endotérmico dos materiais presentes na amostra, bem como a entalpia. Já a análise Termogravimétrica (TGA), se baseia na perda de massa com a variação da temperatura. A análise térmica da amostra de concreto foi realizada no Laboratório de Cerâmica Técnica do IDT/UNESC, em atmosfera de ar sintético, no intervalo de temperatura de 20 a 1000 °C e taxa de aquecimento de 10 °C/min no equipamento TA instrument, modelo Q600 simultaneous TGA/DSC. O objetivo deste ensaio foi obter mais informações sobre a composição, transições de fase e reações químicas.

2.2.11 Análise de Variância (ANOVA)

Os resultados obtidos com os ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade, tração por compressão diametral, foram analisados pelo método de análise de variância (ANOVA) com auxílio do Microsoft Excel. Esta ferramenta de análise estatística permite uma análise do nível de variância das amostras, ou seja, se há ou não diferença significativa entre as amostras, com um intervalo de confiança de 95 %. Outros possíveis resultados foram interpretados de forma comparativa ou qualitativa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os resultados obtidos com a composição granulométrica e a massa específica dos agregados naturais e reciclados são apresentados na Tabela 02. Percebe-se uma diferença entre as densidades dos agregados, principalmente a dos agregados graúdos, nota-se um decréscimo de 15,13 % da massa específica do agregado

gráudo reciclado em relação ao agregado gráudo natural. Enquanto no agregado miúdo reciclado há um decréscimo de apenas 3,45 % da massa específica em relação ao agregado miúdo natural. Esses decréscimos na massa específica são fatores que influenciam diretamente na massa específica do concreto.

Os resultados de massa específica (Tabela 02) confirmam as menores densidades dos materiais reciclados em relação aos materiais referências, compactuando com os resultados obtidos por Leite (2001).

O módulo de finura (Tabela 02) para o agregado miúdo reciclado apresentou-se semelhante ao do agregado referência, sendo 0,42 % superior. Os agregados miúdos reciclados e os agregados miúdos naturais se enquadram na zona ótima, pois seus módulos de finura situam-se no intervalo entre 2,20 a 2,90, determinado de acordo com a norma NBR 7211/2009.

O agregado gráudo natural se enquadrou na zona granulométrica (9,5 / 25), já o agregado gráudo reciclado não se enquadrou em nenhuma das zonas granulométricas (4,75 / 12,5 e 9,5 / 25) estipuladas pela norma NBR 7211/2009.

Tabela 02 - Caracterização dos agregados

Ensaio	Material				Norma
	Agregado miúdo natural	Agregado miúdo reciclado	Agregado gráudo natural	Agregado gráudo reciclado	
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	4,75	25	25	NBR NM 248/2003
Massa específica (g/cm ³)	2,61	2,52	3,04	2,58	NBR NM 52/2009 NBR NM 53/2009
Módulo de finura	2,36	2,37	6,99	7,10	NBR NM 248/2003
Material pulverulento (%)	0,58	11,62	-	-	NBR NM 46/2003
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,56	1,24	1,51	1,00	NBR NM 45/2006
Volume de vazios (%)	39,86	33,92	50,33	60,85	NBR NM 45/2006

Fonte: Autor, 2017.

O agregado miúdo reciclado apresentou um percentual de material pulverulento, acima do limite estipulado pela norma. A NBR 7211/2009 estabelece um limite de 5,0 % de material pulverulento, para que o mesmo possa ser aplicado no concreto, desta maneira, apenas o agregado natural se enquadrou dentro deste limite.

O agregado gráudo reciclado possui massa unitária 33,77 % menor que o agregado gráudo natural. Para o agregado miúdo reciclado a diferença é menor, a massa unitária é 20,51 % inferior ao natural.

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O objetivo desse trabalho era alcançar a resistência mecânica sem diferença significativa das amostras com adição de agregados reciclados em relação à amostra de referência, para o concreto com idade de 28 dias. Resultados obtidos em todas as amostras, exceto na amostra do concreto 30 MPa com 60 % de adição de agregados reciclados, que apresentou variação significativa, $F = 14,122$ maior que $F_{\text{crítico}} = 5,987$. Apresentando um valor superior à amostra de referência (Tabela 03). Ao comparar as resistências dos concretos produzidos com agregados reciclados com as dos concretos de referência, demonstradas na Tabela 03, constatou-se que, em geral, após 28 dias, não houve aumento de resistência significativa, o qual foi atribuído ao traço escolhido, objetivo deste trabalho de pesquisa. Entretanto, após 90 dias, houve um aumento de resistência significativa do concreto de referência em relação aos concretos com adição de agregados reciclados.

Tabela 03 - Resistência à compressão axial.

Amostras	Compressão Axial 28 Dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Compressão Axial 90 Dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Resistência em relação ao referência com 28 Dias (%)	Evolução das resistências 28 - 90 Dias (%)	Resistência em relação ao referência com 90 Dias (%)
CONCRETO 20							
Ref.	21,80	0,99	33,73	0,17	-	54,70	-
30 % de Agr. Rec.	22,48	0,78	30,83	0,66	3,10 *	37,15	-8,60
60 % de Agr. Rec.	22,03	0,68	27,90	0,98	1,03 *	26,67	-17,27
100 % de Agr. Rec.	20,28	1,21	24,20	1,41	-7,00 *	19,36	-28,24
CONCRETO 30							
Ref.	29,13	1,55	42,85	1,63	-	47,12	-
30 % de Agr. Rec.	29,83	1,32	39,55	0,37	2,40 *	32,61	-7,70
60 % de Agr. Rec.	32,38	0,77	37,83	1,61	11,16	16,83	-11,73
100 % de Agr. Rec.	28,03	1,34	32,65	1,50	-3,78 *	16,50	-23,80

* Sem diferença significativa

Fonte: Autor, 2017.

A resistência à compressão do concreto é influenciada diretamente pela quantidade de agregado reciclado inseridos na mistura, e geralmente, a resistência diminui com o aumento do percentual de substituição (XIAO et al, 2012).

De acordo com Leite (2001), uma das melhorias dos agregados reciclados na resistência à compressão dos concretos, é que por possuírem um maior número de finos no contorno da superfície, podem reduzir a espessura da zona de transição

entre os agregados e a pasta de cimento, podendo propiciar desta maneira uma melhoria nas propriedades mecânicas dos concretos.

3.3 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O comportamento das composições quanto à resistência a tração por compressão diametral foi semelhante ao visto na resistência à compressão axial, tendo em vista que a princípio nos 28 dias não houve diferença significativa entre as amostras com substituições em relação à amostra de referência, mas assim como ocorrido no ensaio de compressão axial, aos 90 de dias de idade houve um aumento significativo na resistência, proporcionalmente a adição de agregados reciclados.

Na Tabela 04 pode ser observado o comportamento da resistência à tração por compressão diametral das amostras produzidas.

Tabela 04 - Resistência à tração por compressão diametral.

Amostras	Tração por Compressão Diametral 28 Dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Tração por Compressão Diametral 90 Dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Resistência em relação ao referência com 28 Dias (%)	Evolução das resistências 28 - 90 Dias (%)	Resistência em relação ao referência com 90 Dias (%)
CONCRETO 20 Mpa							
Ref.	3,09	0,22	4,22	0,48	-	36,57	-
30 % de Agr. Rec.	2,66	0,39	3,71	0,20	-13,92 *	39,47	-12,09 *
60 % de Agr. Rec.	2,82	0,08	3,45	0,19	-8,74 *	22,34	-18,25
100 % de Agr. Rec.	2,84	0,09	3,03	0,41	-8,09 *	6,69 *	-28,20
CONCRETO 30 Mpa							
Ref.	3,56	0,25	4,65	0,46	-	30,62	-
30 % de Agr. Rec.	3,48	0,30	4,26	0,15	-2,19 *	22,33	-8,40 *
60 % de Agr. Rec.	3,34	0,42	3,92	0,39	-6,16 *	17,38 *	-15,68 *
100 % de Agr. Rec.	3,09	0,30	3,77	0,41	-13,18 *	22,00	-18,91

* Sem diferença significativa

Fonte: Autor, 2017.

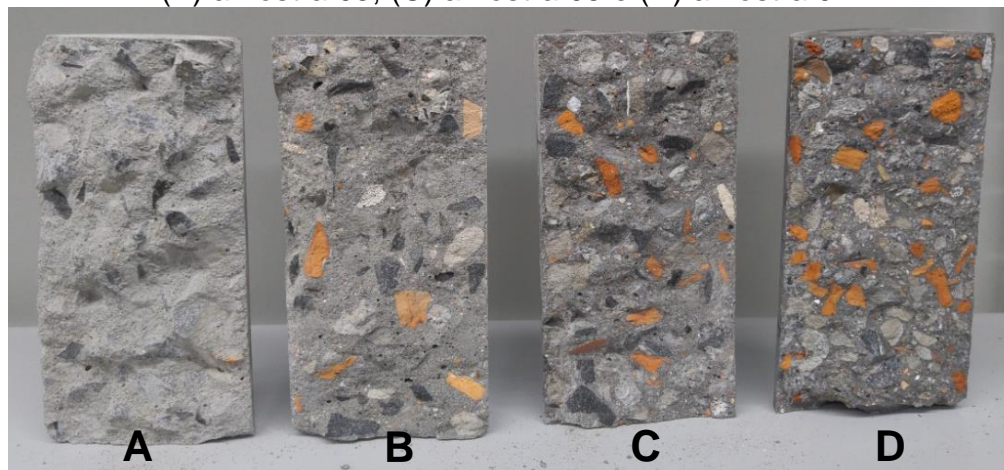
Ao se analisar a Tabela 04, percebe-se que a resistência à tração do concreto produzido com a substituição de agregados reciclados é menos afetada do que a resistência à compressão. Para Etxeberria et al. (2007), a melhora dessa propriedade no concreto pôde ser dada pela alta absorção da argamassa aderida ao agregado e a zona de transição efetiva (fixação boa entre o agregado e a matriz de argamassa).

Os resultados obtidos em idades mais avançadas seguiram uma proposta expressa por Mehta e Monteiro (1994), que consideram a existência de uma forte aderência

física entre a pasta de cimento e a superfície rugosa do agregado nas primeiras idades, e que em idades mais avançadas, esta interação deixa de ter efeito e passa haver o efeito da interação química entre o agregado e a pasta de cimento, e segundo os autores, essa foi à explicação para que houvesse uma diminuição da resistência à tração do concreto reciclado em relação ao concreto convencional com idades mais avançadas.

Na Figura 02 estão dispostos os corpos de prova das composições referentes às resistências de 30 MPa, após serem rompidos por compressão diametral.

Figura 02 - Corpos de prova após ensaio de compressão diametral (A) amostra 01, (B) amostra 03, (C) amostra 05 e (D) amostra 07.



Fonte: Autor, 2017.

3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade (Tabela 05), todas as amostras obtiveram diferença significativa em relação à amostra referência tanto para a dosagem de 30 MPa quanto para a de 20 MPa, em ambas as idades. Percebe-se a diminuição significativa do módulo de elasticidade, das amostras com adição de agregados reciclados em relação às amostras de referência, tanto nas primeiras idades como em idades mais avançadas, ou seja, à medida que se aumenta o teor de agregados reciclados na mistura o módulo de elasticidade diminui.

Tabela 05 - Módulo de elasticidade.

Amostras	Módulo de Elasticidade 28 Dias (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Módulo de Elasticidade 90 Dias (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Resistência em relação ao referência com 28 Dias (%)	Evolução das resistências 28 - 90 Dias (%)	Resistência em relação ao referência com 90 Dias (%)
CONCRETO 20 Mpa							
Ref.	39,01	2,00	42,08	0,79	-	7,86	-
30 % de Agr. Rec.	29,90	0,95	33,31	3,79	-23,36	11,40 *	-20,84
60 % de Agr. Rec.	22,81	0,82	24,47	0,78	-41,53	7,27	-41,85
100 % de Agr. Rec.	16,80	0,91	18,30	1,20	-56,94	8,90 *	-56,52
CONCRETO 30 Mpa							
Ref.	42,69	0,16	45,71	1,43	-	7,08	-
30 % de Agr. Rec.	33,95	2,10	37,73	2,08	-20,47	11,13	-17,46
60 % de Agr. Rec.	27,16	2,08	28,68	1,48	-36,38	5,60 *	-37,26
100 % de Agr. Rec.	22,28	1,20	21,14	0,69	-47,81	-5,11 *	-53,75

* Sem diferença significativa

Fonte: Autor, 2017.

Os valores obtidos no ensaio de módulo de elasticidade seguiram a tendência expressada por Mehta e Monteiro (2008), em que uma maior quantidade de agregados menos densos no concreto, resulta em menores valores do módulo de elasticidade.

Como os agregados reciclados apresentaram densidades menores que a dos agregados naturais (referência), conseqüentemente o módulo de elasticidade apresentou-se menor, de acordo com a taxa de adição de agregados reciclados.

Os resultados seguiram uma tendência de acordo com Hansen (1992 apud LEITE, 2001), em que concretos com adições de agregados reciclados apresentam uma redução entre 15 % a 40 % do módulo de elasticidade em relação aos concretos com agregados naturais. E que segundo alguns trabalhos efetuados pelo autor a diferença cresce quando além do agregado graúdo, o agregado miúdo também é utilizado.

3.5 MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Constam na Tabela 06 os valores da massa específica, índice de vazios e absorção de água respectivamente, do concreto com 165 dias de idade. Dados estes extraídos da (médias das duas moldagens), em função da porcentagem de agregados reciclados.

Tabela 06 - Massa específica, índice de vazios e absorção de água.

Amostras	Massa específica (Kg/m ³)	Desvio Padrão (Kg/m ³)	Massa específica em relação ao referência (%)	Índice de Vazios (%)	Desvio Padrão (%)	Absorção de Água (%)	Desvio Padrão (%)	Fator de Eficiência (%)
CONCRETO 20 Mpa								
Ref.	2685,77	8,5688	-	12,17	0,53	5,16	0,24	1,26
30 % de Agr. Rec.	2543,09	14,2020	-5,31	13,73	0,51	6,26	0,23	1,21
60 % de Agr. Rec.	2501,15	1,1675	-6,87	17,85	0,06	8,69	0,04	1,12
100 % de Agr. Rec.	2422,73	12,6045	-9,79	23,40	0,03	12,61	0,05	1,00
CONCRETO 30 Mpa								
Ref.	2683,67	5,1337	-	10,90	0,28	4,56	0,12	1,60
30 % de Agr. Rec.	2552,12	2,5494	-4,90	11,11	0,44	4,90	0,23	1,55
60 % de Agr. Rec.	2498,67	5,1118	-6,89	15,15	0,27	7,14	0,14	1,51
100 % de Agr. Rec.	2441,56	40,7825	-9,02	19,02	1,76	9,62	1,26	1,34

Fonte: Autor, 2017.

Analisando a Tabela 06, onde se encontram os valores obtidos de massa específica, índice de vazios e absorção de água, percebe-se que a densidade diminui proporcionalmente com o aumento da adição de agregados reciclados, comprovando os estudos de Leite (2001), que observa que quanto maior o teor de substituição do agregado reciclado, menor será a massa específica do concreto, devido ao fato do agregado reciclado possuir maior porosidade intrínseca.

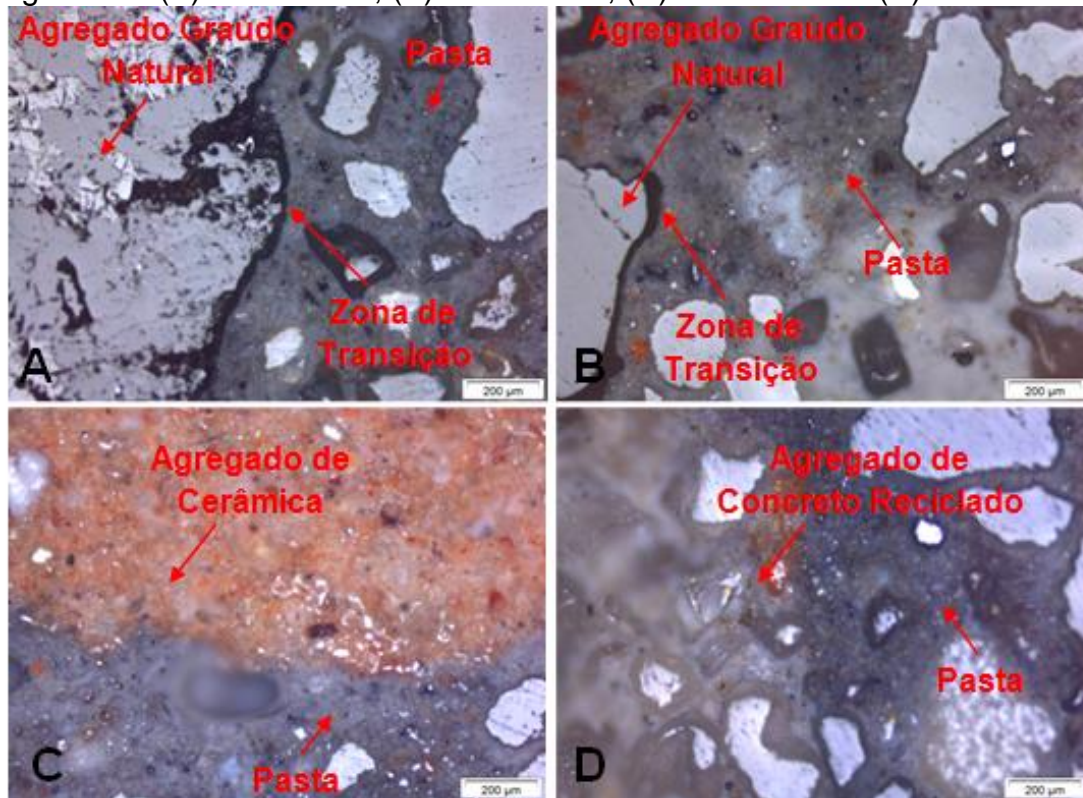
Percebe-se que as amostras com adições de agregados reciclados apresentaram, em geral, maior índice de vazios bem como maior absorção de água em relação aos concretos de referências, crescendo proporcionalmente com a adição de agregados reciclados a mistura, demonstrando que os agregados reciclados influíram negativamente na porosidade do compósito.

Com relação à absorção de água e índice de vazios, Carrijo (2005) percebeu uma tendência de crescimento de seus valores em função do aumento da relação a/c e da redução da massa específica dos agregados.

3.6 MICROSCOPIA

A Figura 03 apresenta as imagens obtidas através do ensaio de microscopia do concreto com 127 dias de idade.

Figura 03 - (A) Amostra 01, (B) Amostra 06, (C) Amostra 05 e (D) Amostra 03.



Fonte: Autor, 2017.

Nas imagens é possível verificar na Figura 03 (A) que representa a amostra de referência, nitidamente percebe-se a zona de transição que se forma entre o agregado graúdo e a pasta de cimento.

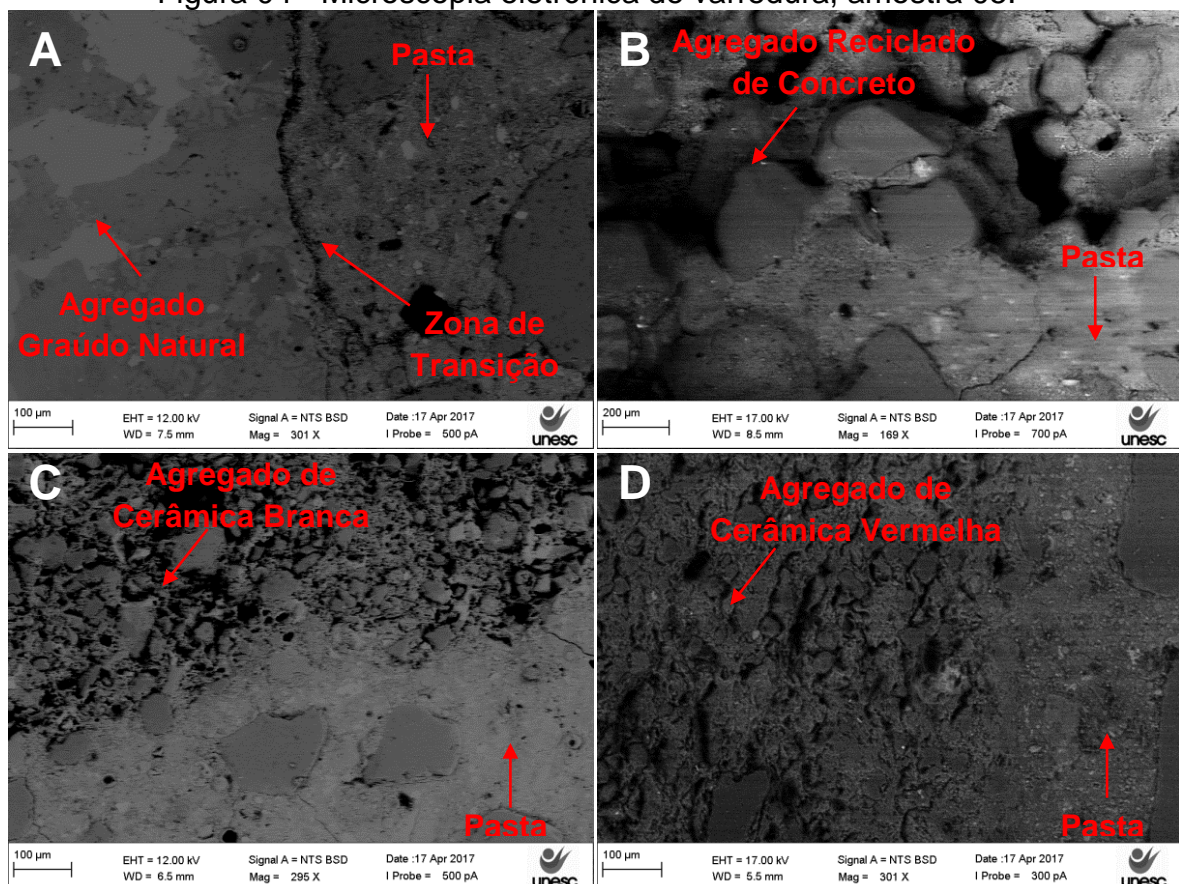
A zona de transição encontra-se na interface que existe entre partículas grandes do agregado e a pasta de cimento hidratada (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Já na Figura 03 (B) representa uma amostra com adição de agregados reciclados, percebe-se que a zona de transição torna-se mais fina ou até inexistente como mostrado na Figura 03 (C) que representa um agregado reciclado de origem cerâmica em contato com a pasta de cimento e a Figura (D) que representa um agregado concreto reciclado em contato com a pasta de cimento. Por serem mais porosos, os agregados reciclados absorvem mais a água, deixando uma menor quantidade de água para a hidratação do cimento contribuindo assim para um acréscimo de resistência através de uma menor relação a/c .

3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Figura 04 apresenta as imagens obtidas através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), da amostra 05 do concreto com 137 dias de idade. Observa-se que na Figura 04 (A) uma pequena zona de transição se forma entre os agregados graúdo natural e a pasta de cimento, enquanto nos agregados reciclados a pasta e a zona de transição praticamente se confundem. A Figura 04 (B) representa zona de transição entre o agregado graúdo reciclado de concreto e a pasta de cimento. A Figura 04 (C) representa zona de transição entre o agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha e a pasta de cimento. A Figura 04 (D) representa zona de transição entre o agregado graúdo reciclado de cerâmica branca e a pasta de cimento.

Figura 04 - Microscopia eletrônica de varredura, amostra 05.



Fonte: Autor, 2017.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), inicialmente no concreto fresco recém-compactado, filmes de água se formam em torno das partículas grandes dos

agregados, gerando assim uma maior relação água/cimento nas regiões próximas do agregado. Esse aumento na relação água/cimento forma cristais relativamente maiores, formando assim uma matriz mais porosa do que a matriz da pasta do cimento.

Devido à porosidade dos agregados reciclados e seu alto índice de absorção de água, a relação água/cimento diminui na região próxima a região do agregado possibilitando melhorias na aderência pasta/agregado.

A zona de transição, na interface, geralmente é considerada o elo mais fraco da corrente do concreto e é considerada a fase limitante da resistência do concreto (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

3.8 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

Na Tabela 07 se apresenta a análise química obtida por FRX da amostra 05 do concreto com 162 dias de idade.

Tabela 07 - Ensaio de fluorescência de raios X da amostra 05.

Elementos	Teor (%)	Elementos	Teor (%)
Al ₂ O ₃	7,68	B ₂ O ₃	-
CaO	12,14	Li ₂ O	-
Fe ₂ O ₃	3,39	BaO	0,09
K ₂ O	1,28	Co ₂ O ₃	< 0,1
MgO	2,05	Cr ₂ O ₃	< 0,1
MnO	< 0,05	PbO	< 0,1
Na ₂ O	0,96	SrO	0,10
P ₂ O ₅	0,07	ZnO	< 0,1
SiO ₂	65,56	ZrO ₂ +HfO ₂	< 0,1
TiO ₂	0,47	Perda Fogo	6,15

Análise Química Qualitativa

Elementos Majoritários	Si, Ca;
Elementos em Pequeno Percentual	Al, Fe, K, Mg, S;
Elementos Traços	Na, P, Zn, Ga, Sr, Y, Zr, Ce.

Fonte: Autor, 2017.

Podem ser observados componentes típicos de materiais cimentícios e de materiais originários dos resíduos da construção civil. Sabe-se que são utilizados concreto,

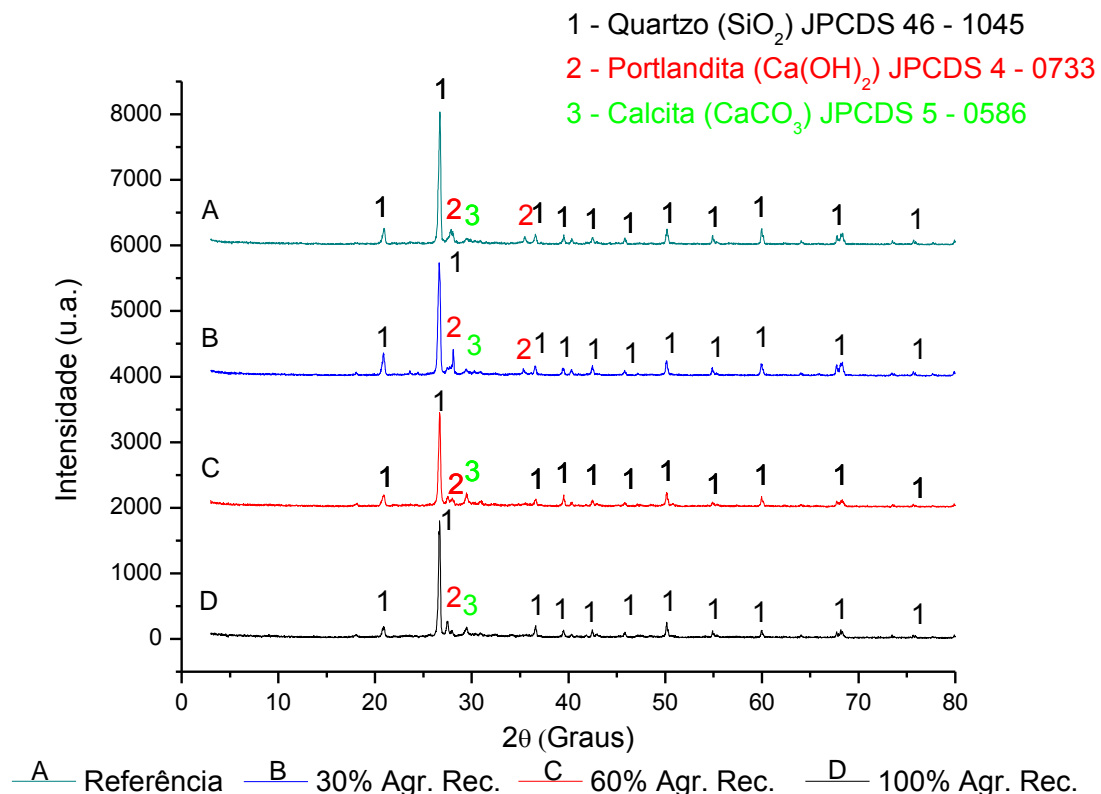
tijolos, gesso, revestimentos cerâmicos entre outros e por isso ocorre a presença majoritária dos óxidos SiO_2 , CaO ; em menor percentual Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MgO e ainda o enxofre (S); além de outros elementos traços. Deve ser observado que esta análise foi obtida com 60 % de adição de agregados reciclados. Destaca-se ainda que a composição química do material referência comparada ao material onde se adicionou percentuais de rejeito não apresenta diferenças significativas.

Esse fato corroborado pelo ensaio de difração de raios X, que apresenta as mesmas fases em todas as misturas e também na amostra de referência.

3.9 DIFRATOMETRIA (DIFRAÇÃO) DE RAIOS X (DRX)

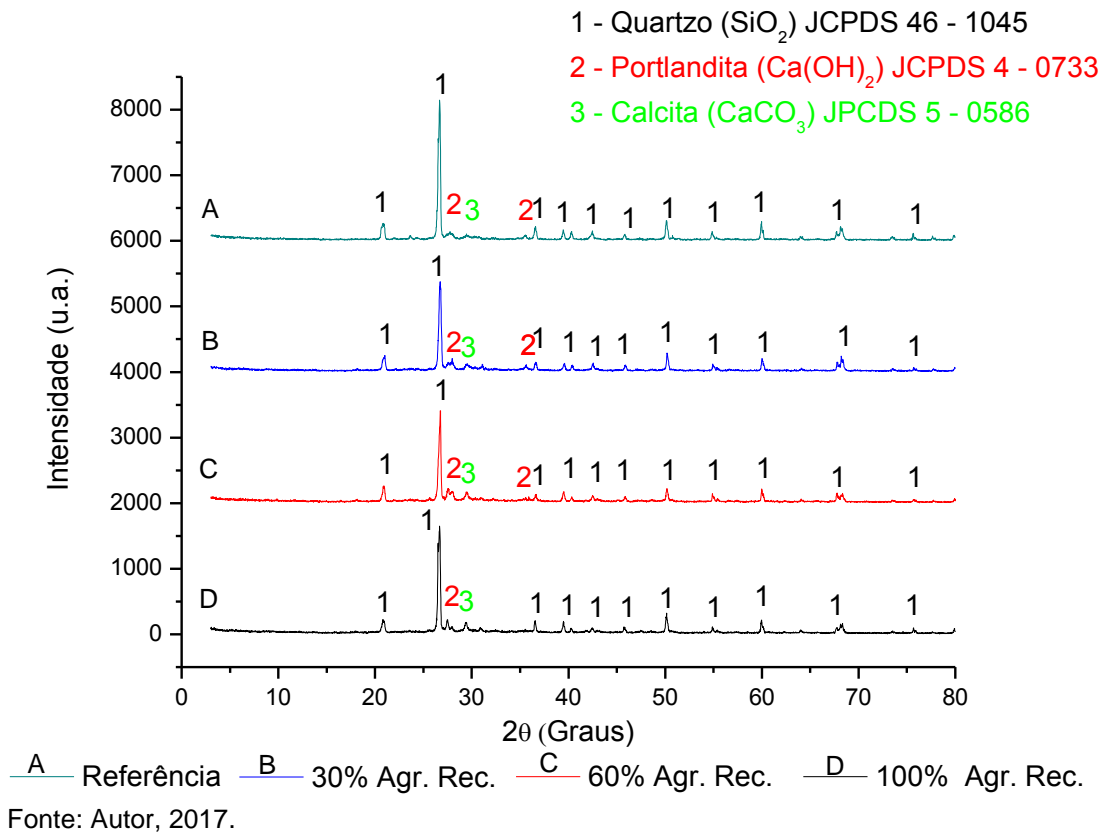
As Figuras 05 e 06 apresentam os difratogramas das amostras dos oito traços avaliados nessa pesquisa, nos quatro teores de adições de agregados reciclados.

Figura 05 - Difração de raios X (concreto 30 MPa)



Fonte: Autor, 2017.

Figura 06 - Difração de raios X (concreto 20 MPa)



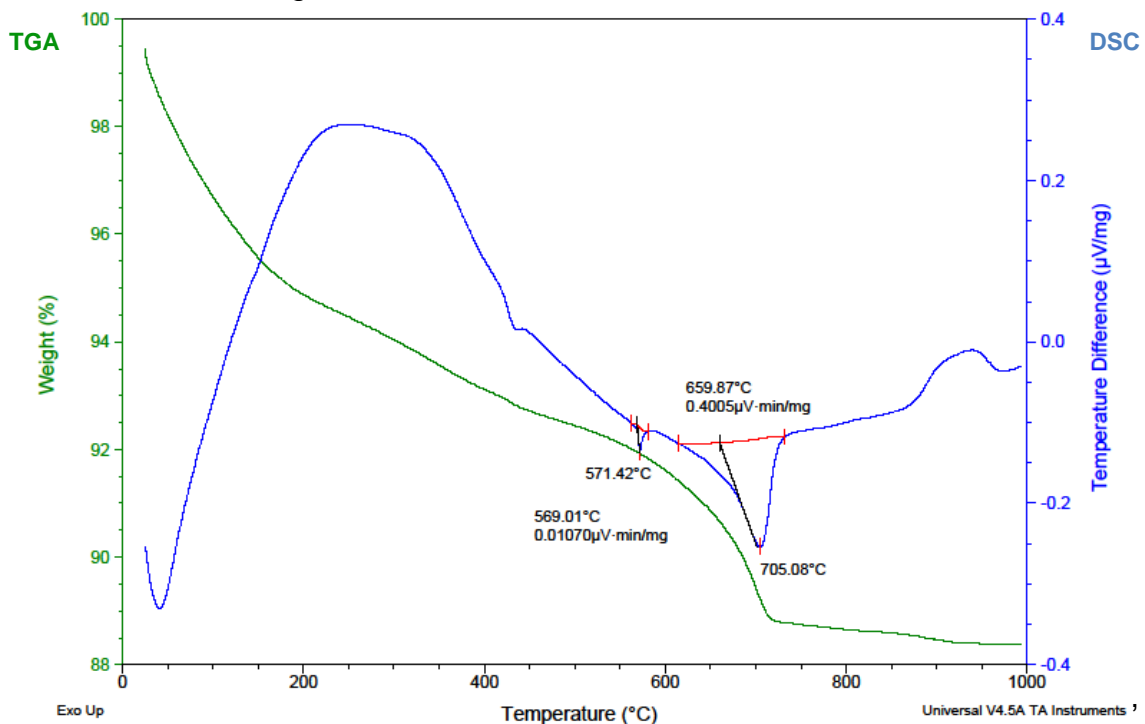
Observando-se as Figuras 05 e 06, onde se apresentam os difratogramas de raios X referentes às amostras dos traços de 30 MPa e 20 MPa respectivamente do concreto com 102 dias de idade., pode-se constatar que basicamente apresentam três fases: Quartzo (SiO_2) cartão JPCDS 46-1045; Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) cartão JPCDS 4-0733; Calcita (CaCO_3) cartão JPCDS 5-0586. Essas fases são encontradas com bastante frequência em amostras de concreto, compactuando com os resultados obtidos por Romano, (2016).

A presença de quartzo, calcita e portlandita eram aguardadas, pois são típicas em amostras de materiais cimentícios. A adição de maior quantidade de resíduos, não alterou significativamente a presença/quantidade dessas fases.

3.10 ANÁLISE TÉRMICA (TGA-DSC)

Na Figura 07, pode ser observado o comportamento termogravimétrico (TGA) e a análise realizada no calorímetro diferencial de varredura (DSC) do concreto com 179 dias de idade.

Figura 07 - Análise térmica da amostra 05.



Fonte: Autor, 2017

Observa-se que inicialmente ocorre uma perda de massa devido principalmente à perda de água absorvida. Próximo a 430 °C tem-se um evento que pode ser atribuído a uma pequena quantidade de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (MEDEIROS et al., 2015), que também aparece identificada na difração de raios X, e tem a presença marcada nas análises térmicas. Em 571,47 °C ocorre a transformação do quartzo alfa para o quartzo beta. O pico que aparece em 705,08 °C pode ser atribuído tanto a decomposição da portlandita como a da calcita, pois o evento inicia aproximadamente a 600 °C e finaliza a 750 °C, e é marcado pela característica endotérmica. Já aproximadamente a 950 °C ocorre um pico exotérmico, provavelmente decorrente da formação de mulita, haja vista que se tem a presença de alumínio e silício. A mulita é aluminossilicato em que sua composição pode variar de $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ a $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ e sua densidade varia entre $3,16 \text{ g/cm}^3$ a $3,22 \text{ g/cm}^3$.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que:

- As taxas de absorção de água e índices de vazios dos concretos produzidos com agregados reciclados são superiores, em comparação aos concretos

convencionais, tal característica influi negativamente na porosidade do concreto. Visto que as resistências mecânicas do concreto estão diretamente ligadas à porosidade do mesmo.

- Os concretos com adições de agregados reciclados em relação aos concretos de referência apresentam menores taxas de crescimento de resistência dos 28 aos 90 dias. Taxas estas que descessem com o aumento no teor de agregados reciclados inseridos no concreto.
- Em comparação com os concretos convencionais de referência, os concretos com adições de agregados reciclados requerem uma maior relação a/c, fazendo-se assim necessárias maiores doses de aditivo para alcançar uma melhor consistência plástica.
- A massa específica dos concretos produzidos com agregados reciclados é inferior que a massa específica dos concretos produzidos com agregados naturais. A redução da massa específica dos concretos com agregados reciclados esta diretamente ligada com a proporção de agregados reciclados inseridos na mistura. Sendo que quanto maior a proporção de agregados reciclados inseridos na amostra, menor será a massa específica do concreto produzido. Tal fato pode ser atribuído à alta porosidade dos agregados de origem reciclada, principalmente o agregado graúdo.
- A análise microestrutural do concreto evidenciou uma melhoria na zona de transição entre os agregados e a pasta, nos concretos com adições de agregados reciclados.
- Os resultados dos ensaios de DRX possibilitaram a identificação das principais fases cristalinas presentes na amostra como quartzo, portlandita e calcita. Mostrou ainda que a adição de agregados reciclados à mistura não alterou significativamente a presença/quantidade dessas fases.

Com base nos resultados encontrados nesta pesquisa, pode-se afirmar que é possível o uso deste material em aplicações no concreto, contudo devem ser observadas algumas particularidades: sua menor resistência em idades avançadas, maior deformabilidade, maior porosidade, menor massa específica, as quais podem limitar seu uso em alguns casos.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

_____**NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____**NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

_____**NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

_____**NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

_____**NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

_____**NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático e de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

_____**NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2011.

_____**NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

_____**NBR 9778: Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

BLUMENSCHNEIN, R. N. **Manual Técnico: Gestão de Resíduos Sólidos em Canteiro de Obras**. Brasília: Serviço Brasileiro de Apoio as Micro e Pequenas Empresas – SEBRAE/DF. 2007.48 p.

BRUKER – **Fluorescência de raios X (XFR)**. Disponível em: <<https://www.bruker.com>>. Acesso em: 19 maio. 2017.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução 307, de 05 de julho de 2002**: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>. Acesso em: 01 setembro. 2016.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; BARRA, M.M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**. V. 37, p. 735-742, 2007.

HANSEN, T.C. **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 316p. Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

LEITE, M. Batista. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MEDEIROS, M. H. F. de. et al. Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando Difração de Raios X. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 19-29, 2015.

MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

_____. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

PATTO, Andre Luiz Duqui Brunini. **Minimização de impactos ambientais com a utilização de resíduos de construção e demolição como agregados**. Taubaté, SP: 2006.

ROMANO, R. C. O. et al. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**. São Paulo, vol.62, n.363, pp.215-223. 2016.

XIAO, J.; LI, W.; FAN, Y.; HUANG, X. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). **Construction and Building Materials**. V. 31, p. 364-383, 2012.