

SÉRGIO CIRELLI ANGULO

CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS  
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS E A  
INFLUÊNCIA DE SUAS CARACTERÍSTICAS NO  
COMPORTAMENTO DE CONCRETOS

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título  
de Doutor em Engenharia.

São Paulo  
2005

SÉRGIO CIRELLI ANGULO

CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS  
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS E A  
INFLUÊNCIA DE SUAS CARACTERÍSTICAS NO  
COMPORTAMENTO DE CONCRETOS

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título  
de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:  
Engenharia de Construção Civil e  
Urbana.

Orientador:  
Prof. Dr. Vanderley M. John

Co-orientador:  
Prof. Dr. Henrique Kahn

São Paulo  
2005

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Ângulo, Sérgio Cirelli**

**Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos / S.C. Angulo. – São Paulo, 2005.**

**167 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.**

**1.Resíduos de construção 2.Agregados (Reciclagem)  
3.Caracterização tecnológica de minérios 4.Concreto 5.Usinas de reciclagem de resíduos urbanos 6.Controle da qualidade  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.**

## **Amor Bastante**

Paulo Leminski

quando eu vi você  
tive uma idéia brilhante  
foi como se eu olhasse  
de dentro de um diamante  
e meu olho ganhasse  
mil faces num só instante

basta um instante  
e você tem amor bastante

um bom poema  
leva anos  
cinco jogando bola,  
mais cinco estudando sânscrito,  
seis carregando pedra,  
nove namorando a vizinha,  
sete levando porrada,  
quatro andando sozinho,  
três mudando de cidade,  
dez trocando de assunto,  
uma eternidade, eu e você,  
caminhando junto

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial:  
- Meus pais (Ivan e Regina), grandes incentivadores da minha carreira acadêmica.  
- Yolanda (*in memoriam*), com todo o meu amor, pela experiência transmitida e acompanhamento nos meus primeiros anos de estudo.

## AGRADECIMENTOS

Realizado por uma equipe, este trabalho em alguns momentos ultrapassou nossos limites individuais, superando até necessidades pessoais. Valeu! No seu desenvolvimento, permitiu também um maduro relacionamento profissional e laços fortes de respeito e amizade. Essa é a minha alegria!

Prof. Dr. VANDERLEY M. JOHN, muito obrigado pela orientação e amizade. Palavras são insuficientes para expressar meu respeito e admiração profissional por você. A sua ajuda profissional foi e é imprescindível na minha carreira.

Prof. Dr. HENRIQUE KAHN, agradeço sua colaboração e amizade. Obrigado por todos os ensinamentos, de mineralogia a técnicas analíticas de caracterização. Respeito seu trabalho e admiro sua luta. A Engenharia de Minas ganha um fiel seguidor (eu), graças a você. Ah, não desisti da análise de imagem!

Mestranda Eng. CARINA ULSEN, agradeço sua sinceridade, seriedade e profissionalismo. O nosso programa experimental tem muito do seu perfeccionismo! Foi um prazer tê-la na equipe e tenho certeza que continuará sendo. Acompanho e torço pelo seu sucesso como pesquisadora. Ah!, e chega de quebrar o pé.

M. Eng. PRISCILA M. CARRIJO, obrigado por não me abandonar no meio de todos os problemas experimentais que tivemos e por ter suportado essas dificuldades até acima dos seus limites. Eu descobri em você uma amiga e uma pesquisadora inteligente e incansável. Suas intuições experimentais foram de vital importância para a saúde dos nossos concretos (a história da pá, se é que você me entende).

Prof. Dr. ANTONIO DOMINGUES, foi muito prazeroso dosarmos e analisarmos os nossos concretos. Admiro sua percepção e capacidade científica assim como prezo muito sua amizade.

Prof. Dr. MARIA ALBA CINCOTTO, devo-lhe muito do conhecimento adquirido em química de materiais de construção civil e técnicas analíticas. Agradeço a honra de trabalhar com você.

Prof. Dr. ARTHUR PINTO CHAVES, obrigado pelo apoio na realização do programa experimental e por suas valiosas contribuições a esta tese.

Agradeço à FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS, através do Fundo Verde e Amarelo, e FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO pelo financiamento desta pesquisa. Ao CONSELHO NACIONAL DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (CNPq) pela concessão da minha bolsa de doutorado e das bolsas de iniciação científica.

Agradecimento à ENGRÁCIA BARTUCIOTTI na organização e controle financeiro impecável durante a execução dos projetos de pesquisa. Admiro muito seu profissionalismo.

Agradeço à ILDA, ALFREDO, ANTÔNIO ANGELONI (TICO), JUSCELINO pelo dedicado auxílio nos laboratórios LTM e LCT da Engenharia de Minas.

Aos alunos de Iniciação Científica da Escola Politécnica da USP, PAULA CIMINELLI RAMALHO e RAQUEL MASSAMI SILVA, ao estagiário HILTON MARIANO, e a Eng. IVIE PIETRA, obrigado pela ajuda inestimável no desenvolvimento e realização desta pesquisa.

Ao ISMAEL CAMPAROTTO, MÁRIO TAKEASHI, REGINALDO SILVA, ADILSON SANTOS, RENTA MONTE e JOÃO SOARES, agradecimentos pelo auxílio nos laboratórios de Microestrutura e no CPqDcc da Engenharia Civil.

Agradeço à Prefeitura de São Paulo (Sr. DAN MOCHE SCHNEIDER, HILDO, NILSON e demais funcionários da usina de reciclagem de Itaquera), à empresa NORTEC (Sr. ARTUR GRANATO e demais funcionários), à Prefeitura de Vinhedo (Sr. GERALDO FREITAS, HENRIQUE e demais funcionários) pela ajuda na coleta das amostras.

Aos professores Alexandre Kawano, Paulo Monteiro, Paulo Helene, Wellington Repette sinceros agradecimentos pelos conhecimentos transmitidos no curso de pós-graduação.

À Fátima Regina G. Sanches Domingues, Paulo Heitzmann, Maria de Fátima da Silva Paiva, Leonor Madalena Machado Rosa Andrade e Vilma da secretaria e biblioteca da Engenharia Civil meu muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Enric Ramonich Vazquez agradeço pelo empenho e colaboração no pedido da bolsa “sanduíche” que infelizmente não se efetivou.

EM ESPECIAL:

AOS MEUS VERDADEIROS AMIGOS.....  
VOCÊS SÃO PESSOAS FUNDAMENTAIS PARA MIM.....

## RESUMO

Entre os desafios para a expansão de mercado da reciclagem, encontra-se o de viabilizar o emprego dos agregados de resíduos de construção e demolição (RCD) reciclados em concretos. No entanto as normas que regulamentam tal emprego não são facilmente aplicáveis nas usinas de reciclagem, existindo pouca informação sistemática de como as diferentes características dos agregados de RCD reciclados influenciam no desempenho do concreto.

O objetivo desta tese é identificar as características dos agregados de RCD reciclados que exerçam influência relevante no comportamento mecânico dos concretos. As seguintes etapas experimentais são desenvolvidas: a) caracterização química e mineralógica das frações granulométricas de três amostras representativas de agregados, b) caracterização das propriedades físicas de agregados graúdos separados por densidade, assim como da composição química, mineralógica e por fases, c) influência das características dos agregados graúdos separados por densidade no comportamento mecânico dos concretos.

Na caracterização dos agregados foram utilizados os seguintes métodos: análise granulométrica, análise química por FRX, análise mineralógica por DRX, determinação da fração solúvel por ataque com solução de HCl 33%, e análise termogravimétrica, separação por densidade empregando líquidos densos e equipamento “Sink and Float”, catação das fases, determinação da massa específica aparente e absorção de água dos agregados, dosagem e avaliação do comportamento mecânico de concretos produzidos com esses agregados.

Os resultados permitem concluir que a porosidade (ou massa específica aparente) dos agregados de RCD reciclados controla o comportamento mecânico dos concretos produzidos com relação água e cimento constante, assim como a soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha – frações mais porosas. A separação por densidade é uma técnica eficiente para separar esses agregados em subgrupos de diferentes porosidades, gerando concretos com comportamento mecânico e absorção de água similares. O estudo realizado aponta para uma densidade de corte em torno de 2,2 a 2,3 g/cm<sup>3</sup>. Os agregados contidos no intervalo “d > 2,2” possuem teores elevados de rochas e teores baixos de cerâmica vermelha, resultando em concretos com comportamento mecânico semelhante ao dos agregados naturais analisados. A avaliação da distribuição de densidade pode ser um método simples e rápido para a classificação de lotes desses agregados e controle do comportamento mecânico dos concretos produzidos. Na fração graúda e miúda, os teores de rochas e cerâmicas são superiores a 50% da massa, e o comportamento dos principais óxidos da composição química é semelhante. Esse comportamento muda significativamente na fração fina, em que predominam os aglomerantes e argilominerais (teores superiores a 77%). A origem (Itaquera e Vinhedo) e a cominuição influenciaram, de forma representativa, a distribuição de massa dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade. O agregado de Itaquera apresentou mais de 70% da massa no intervalo de densidade superior a 2,2 g/cm<sup>3</sup>.

## ABSTRACT

Construction and demolition waste (CDW) recycled aggregates are not largely used in concrete due to CDW composition heterogeneity and CDW recycled aggregate physical property variability from visual classification and hand sorting of proposed standards that provide insufficient relation between the aggregate characteristics and concrete performance.

This thesis aims to identify CDW recycled aggregate characteristics that influence the concrete mechanical performance. The experimental design was divided in three stages: a) detailed chemical and mineralogical characterization of three representative CDW recycled aggregate samples, b) characterization of the physical properties of the coarse CDW recycled aggregates separated by heavy media as well as the composition in terms of chemical, mineralogical, and visual phases, and c) the influence of the coarse CDW recycled aggregate separated by heavy media on concrete mechanical performance.

The following methods were used: particle size distribution, chemical analysis by XRF, mineralogical analysis by XRD, soluble fraction in chloride acid leaching assay, thermal analysis, sequential heavy media and gravity separation, hand sorting, bulk specific gravity and water absorption, concrete mix design and its compressive strength and elastic modulus using the CDW recycled aggregates.

In conclusion, CDW recycled aggregate porosity controls concrete mechanical performance formulated with constant cement and water relation. The concrete mechanical performance is related to bulk specific gravity of CDW recycled aggregates separated by density, including to the sum of binder and red ceramic content. Heavy media and gravity separation is efficient to separate CDW recycled aggregates in bulk specific gravity groups, producing concrete with similar concrete mechanical behavior and water absorption. Cutting density in 2.2-2.3 g/cm<sup>3</sup> seems to be efficient since the aggregates with the upper density have high rock content resulting concrete mechanical performance similar to that produced using natural aggregates. Mass distribution in density separation could be a simple and fast method to classify CDW recycled aggregate and to control concrete mechanical performance. The coarse and sand fraction of CDW recycled aggregates had more than 50% in mass of rocks and ceramics, with quite similar main oxide contents in chemical composition. However, the contents changed in fine fraction (lower than 0.15 mm) whose binder content and clay minerals are in majority (upper to 77% in mass). The origin of CDW recycled aggregate and comminution influenced in mass distribution of sequential density separation. In Itaquera (São Paulo), the mass distribution upper to 2,2 g/cm<sup>3</sup> was around 70%.



# SUMÁRIO

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – DEFINIÇÃO, IMPACTO E GERENCIAMENTO .....</b>	<b>6</b>
2.1	DEFINIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....	6
2.2	IMPACTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NAS CIDADES .....	7
2.3	ESTRATÉGIAS PARA O GERENCIAMENTO ADEQUADO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....	9
2.3.1	<i>Evitar deposições ilegais .....</i>	<i>10</i>
2.3.2	<i>Segregar os tipos de materiais do RCD na fonte .....</i>	<i>11</i>
2.3.3	<i>Estimular a reciclagem .....</i>	<i>15</i>
2.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	20
<b>3</b>	<b>RECICLAGEM DA FRAÇÃO MINERAL DO RCD COMO AGREGADO E O EMPREGO EM CONCRETOS .....</b>	<b>22</b>
3.1	RECICLAGEM DA FRAÇÃO MINERAL DO RCD COMO AGREGADO .....	22
3.1.1	<i>Cominuição .....</i>	<i>24</i>
3.1.2	<i>Separação por tamanho .....</i>	<i>25</i>
3.1.3	<i>Concentração .....</i>	<i>26</i>
3.1.4	<i>Operações auxiliares .....</i>	<i>33</i>
3.1.5	<i>Fluxogramas típicos das usinas de reciclagem .....</i>	<i>33</i>
3.1.6	<i>Controle de qualidade .....</i>	<i>36</i>
3.2	USO DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS EM CONCRETOS .....	37
3.2.1	<i>Recomendações .....</i>	<i>37</i>
3.2.2	<i>Normas técnicas .....</i>	<i>39</i>
3.2.3	<i>Dificuldades na aplicação das normas técnicas em usinas de reciclagem .....</i>	<i>42</i>
3.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	46
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS .....</b>	<b>47</b>
4.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS .....	47
4.1.1	<i>Coleta de amostras representativas .....</i>	<i>47</i>
4.1.2	<i>Análise granulométrica dos agregados e britagem .....</i>	<i>50</i>
4.1.3	<i>Preparação das amostras para análises químicas e mineralógicas ..</i>	<i>51</i>
4.1.4	<i>Análise química por FRX .....</i>	<i>52</i>
4.1.5	<i>Seleção das frações granulométricas para as demais análises .....</i>	<i>53</i>
4.1.6	<i>Análise mineralógica por DRX .....</i>	<i>54</i>
4.1.7	<i>Termogravimetria - antes e após o ataque com HCl 33% .....</i>	<i>54</i>
4.1.8	<i>Estimativa dos teores de aglomerantes .....</i>	<i>54</i>
4.1.9	<i>Estimativa dos teores de argilominerais .....</i>	<i>55</i>
4.1.10	<i>Análise estatística .....</i>	<i>56</i>

4.2	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	56
4.3	RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA POR FRX .....	58
4.3.1	<i>Itaquera vermelho</i> .....	58
4.3.2	<i>Itaquera cinza</i> .....	60
4.3.3	<i>Vinhedo vermelho</i> .....	62
4.3.4	<i>Influência da origem, classificação e granulometria dos agregados de RCD reciclados</i> .....	64
4.3.5	<i>Interpretação dos resultados</i> .....	66
4.4	ANÁLISE MINERALÓGICA POR DRX .....	70
4.5	TERMOGRAVIMETRIA – ANTES E APÓS O ATAQUE COM HCL 33% .....	72
4.6	ESTIMATIVA DOS TEORES DE AGLOMERANTES E DE ARGILOMINERAIS.....	79
4.7	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	80
<b>5</b>	<b>SEPARAÇÃO DENSITÁRIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO REICLADOS .....</b>	<b>83</b>
5.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS .....	84
5.1.1	<i>Preparação das frações granulométricas</i> .....	85
5.1.2	<i>Separação por líquidos densos</i> .....	85
5.1.3	<i>Catação nos produtos separados por densidade</i> .....	87
5.1.4	<i>Determinação da massa específica e absorção de água</i> .....	88
5.1.5	<i>Análise química por FRX</i> .....	90
5.1.6	<i>Seleção de produtos separados por densidade para as demais análises</i> 91	
5.1.7	<i>Análises mineralógicas</i> .....	91
5.1.8	<i>Estimativa dos teores de aglomerantes, de argilominerais e de rochas naturais</i> 91	
5.1.9	<i>Análise estatística</i> .....	92
5.2	Distribuição de massa nos intervalos de densidade .....	92
5.3	Distribuição de fases e as propriedades físicas nos intervalos de densidade 94	
5.4	Análise química por FRX.....	104
5.5	Análise mineralógica por DRX.....	109
5.6	Estimativa dos aglomerantes, dos argilominerais e das rochas.....	112
5.7	Conclusões do capítulo .....	115
<b>6</b>	<b>INFLUÊNCIA DA POROSIDADE DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE RCD REICLADOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO 118</b>	
6.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS .....	119
6.1.1	<i>Coleta das amostras dos agregados graúdos de RCD reciclados</i> ... 119	
6.1.2	<i>Separação dos agregados graúdos de RCD reciclados por densidade</i> 120	
6.1.3	<i>Outros materiais para a produção dos concretos</i> .....	123
6.1.4	<i>Caracterização dos materiais</i> .....	124
6.1.5	<i>Dosagem dos concretos</i> .....	126
6.1.6	<i>Propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido</i> 129	
6.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	129

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

