



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Ricardo Dias Campos Filho

**VERIFICAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE AÇO E CONCRETO COM A  
UTILIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO**

BELO HORIZONTE

2017

C198v Campos Filho, Ricardo Dias  
Verificação da aderência entre aço e concreto com a utilização de agregado graúdo reciclado / Ricardo Dias Campos Filho. – 2017.  
89 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.

Orientador: Nilton da Silva Maia.

Coorientador: Conrado de Souza Rodrigues.

Bibliografia: f. 83-89.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil

1. Construção de concreto – Teses. 2. Aço – Teses. 3. Materiais compostos – Ligação – Teses. 4. Agregados (Materiais de construção) – Reciclagem – Teses. 5. Aderências – Teses. I. Maia, Nilton da Silva. II. Rodrigues, Conrado de Souza. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 693.5

**RICARDO DIAS CAMPOS FILHO**

**VERIFICAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE AÇO E CONCRETO COM A  
UTILIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito Parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientador: Prof. Dr. Nilton da Silva Maia**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues**

**BELO HORIZONTE**

**2017**

**RICARDO DIAS CAMPOS FILHO**

**VERIFICAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE AÇO E CONCRETO COM A  
UTILIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG  
como requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Civil



Prof. Dr. Nilton da Silva Maia  
Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

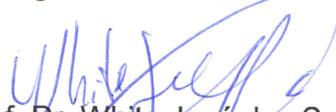


Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues  
Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali  
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. White José dos Santos  
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG

Belo Horizonte, 23 de agosto de 2017

Dedico este trabalho a minha esposa Camila

A meus pais Ricardo e Mônica

A meus irmãos Giovanni e Karine

e aos meus sobrinhos Arthur, Isabela, Mateus e Thomas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por sempre me conduzir nesta trajetória, permitindo essa conquista.

Agradeço a minha esposa Camila, por todo apoio, carinho, paciência, companheirismo e ajuda em todos os momentos.

A meu pai pelo incentivo e apoio incondicional, pelas cobranças e por acreditar no meu esforço.

A minha mãe pelo carinho e amor.

Aos professores Nilton Maia e Conrado Rodrigues, pelos ensinamentos e disponibilidade, por acreditarem no meu trabalho e pela oportunidade proporcionada.

Aos funcionários do CEFET, em especial ao Ivan Morais, pelo auxílio na realização dos ensaios no laboratório.

A SLU, por disponibilizar o material reciclado utilizado neste trabalho, em especial ao Joaquim Pereira, que nos deu todo apoio necessário.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Muito Obrigado.

## RESUMO

A aderência entre o aço e o concreto é a propriedade que garante a eficácia do concreto armado. As normas brasileiras não permitem que os concretos produzidos para fins estruturais tenham agregados reciclados. Porém diversos países já utilizam dessa tecnologia. Sendo assim, o principal objetivo desse trabalho é estudar o comportamento da aderência aço concreto em concretos produzidos com agregado graúdo reciclado que apresente resistência à compressão maior que 25 MPa. Para tanto, o agregado reciclado foi caracterizado, também foram realizados ensaios para caracterização das propriedades mecânicas do concreto: resistência à compressão uniaxial, módulo de elasticidade estático e resistência à tração por compressão diametral. Para avaliação da tensão de aderência foram realizados ensaios de arrancamento direto e ensaio de barras confinadas. Foram moldados corpos de prova com utilização de agregado graúdo convencional, e com 25%, 50% e 100% de substituição do agregado graúdo convencional por reciclado. Os resultados para os ensaios de barras confinadas não satisfizeram a norma NBR 7477 (1982), apresentando um número de fissuras menor que o estabelecido. Os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento foram satisfatórios e apresentaram variações coerentes com o apresentado pela literatura. Apesar dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado não apresentarem prejuízos em relação a tensão de aderência ainda é preciso melhorar as condições de produção do agregado reciclado, para se obter um material com menor percentual de cerâmica vermelha.

**Palavras-Chave:** Aderência aço concreto. Agregado Reciclado. RCD.

## ABSTRACT

The adhesion between steel and concrete is the property that guarantees the effectiveness of reinforced concrete. Brazilian standards does not allow concrete produced for structural purposes to have recycled aggregates. But many countries already use this technology. Therefore, the main objective of this work is to study the behavior of concrete steel adhesion in concretes produced with recycled aggregate having a compressive strength greater than 25 MPa. For this, the recycled aggregate was characterized, also tests were carried out to characterize the mechanical properties of the concrete: resistance to uniaxial compression, static modulus of elasticity and tensile strength by diametrical compression. In order to evaluate the adhesion stress, direct pullout tests were performed. Test specimens were prepared using standard bulk aggregate, with 25% replacement of the standard heavy aggregate by recycling, 50% replacement of the bulk aggregate with recycled and with 100% recycled aggregate. The results for the confined rod tests did not meet the standard, presenting a smaller number of cracks than established. The results obtained in the pullout tests were satisfactory and presented variations consistent with that presented in the literature. Although the concrete produced with recycled aggregate does not present losses in relation to the adhesion tension, it is still necessary to improve the production conditions of the recycled aggregate, in order to obtain a material with a lower percentage of red ceramics.

**Keywords:** Bond stress; Construction and demolition waste (CDW); Recycled Aggregate

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1.	PERGUNTA DA PESQUISA .....	20
1.2.	OBJETIVOS .....	20
1.2.1.	Objetivo Geral.....	20
1.2.2.	Objetivos Específicos .....	20
1.3.	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	21
<b>2.</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA.....</b>	<b>22</b>
2.1.	Resíduos de construção e demolição.....	22
2.2.	Agregados reciclados .....	25
2.3.	Aderência aço-concreto.....	30
2.4.	Tipos de aderência .....	32
2.4.1.	Aderência por adesão .....	32
2.4.2.	Aderência por atrito .....	33
2.4.3.	Aderência mecânica .....	33
2.5.	Tipos de ruptura .....	33
2.6.	Fatores que influenciam a aderência.....	34
2.7.	Ensaio para determinação da tensão de aderência.....	37
2.7.1.	Ensaio de arrancamento direto ("Pull-out Test").....	42
2.7.2.	Ensaio de barras confinadas .....	46
2.8.	Resistência à aderência segundo a ABNT NBR 6118 (2014) .....	48

2.9.	Resistência de aderência segundo a B.A.E.L 91 (2000) .....	48
2.10.	Aderência entre aço e concretos produzidos com agregado reciclado ...	49
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E METODOS.....</b>	<b>51</b>
3.1.	MATERIAIS .....	51
3.2.	MÉTODOS .....	51
3.3.	Caracterização do material agregado reciclado .....	54
3.3.1.	Composição Granulométrica .....	54
3.3.2.	Massa específica, aparente e absorção de água .....	54
3.3.3.	Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem	55
3.3.4.	Determinação da composição dos agregados por análise visual.....	56
3.3.5.	Determinação da massa unitária do agregado graúdo.....	56
3.3.6.	Determinação da abrasão "Los Angeles" .....	57
3.3.7.	Determinação da massa específica do agregado miúdo.....	57
3.4.	Ensaio de arrancamento .....	57
3.4.1.	Determinação do tamanho da amostra .....	58
3.4.2.	Modelos para o ensaio <i>POT</i> .....	58
3.4.3.	Sistema de aplicação de carga ensaio <i>POT</i> .....	59
3.5.	Ensaio de barras confinadas .....	60
3.5.1.	Determinação do tamanho da amostra .....	61
3.5.2.	Modelos para ensaio de barras confinadas.....	61
3.5.3.	Sistema de aplicação da carga.....	61

3.6.	Caracterização do concreto.....	62
3.7.	Programa experimental .....	63
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>64</b>
4.1.	Caracterização do agregado reciclado .....	64
4.1.1.	Composição Granulométrica .....	64
4.1.2.	Propriedades do agregado reciclado.....	65
4.1.3.	Determinação da composição dos agregados por análise visual.....	66
4.2.	Estudo do traço .....	67
4.3.	Caracterização do concreto.....	70
4.4.	Ensaio de tração em barras confinadas .....	72
4.4.1.	Resultados dos ensaios de barras confinadas .....	72
4.4.2.	Cálculo da tensão de aderência através do coeficiente de conformação superficial 74	
4.5.	Ensaio <i>POT</i> .....	75
4.5.1.	Resultados do ensaio <i>POT</i> .....	75
4.5.2.	Análise da resistência versus a porcentagem de adição de agregado reciclado 78	
4.6.	Comparação entre ensaios <i>POT</i> e ensaio de barras confinadas .....	79
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>81</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1-Frequência com que as empresas realizam ensaios técnicos nos produtos. .....	23
Figura 2 - Composição dos RCD que chegam as usinas.....	23
Figura 3 - Surgimento da tensão de aderência. ....	30
Figura 4 - Tipos de aderência aço-concreto.....	32
Figura 5 – Tipos de ruptura da aderência. ....	34
Figura 6 - Ilustração esquemática de características da interface aço-concreto.....	35
Figura 7 - Tensão de aderência versus o diâmetro da barra e resistência à compressão.....	37
Figura 8 - Ensaio de arrancamento. ....	38
Figura 9 - Formulação da tensão de aderência no ensaio de arrancamento direto. .	38
Figura 10 - Comportamento das barras lisas/nervuradas no ensaio de arrancamento direto. ....	39
Figura 11 - Trajetória das tensões no ensaio de arrancamento direto. ....	40
Figura 12 - Distribuição de tensões e fissuração ensaio <i>pull-out</i> . ....	41
Figura 13 - Tensões de tração nas seções fissuradas. ....	42
Figura 14 - <i>Pull-out test</i> . ....	43
Figura 15 - Gráfico tensão <i>versus</i> deslizamento com o máximo ocorrendo após 1,0 mm. ....	44
Figura 16 - Gráfico tensão <i>versus</i> deslizamento com o máximo ocorrendo antes de 1,0mm. ....	45
Figura 17 - Modelo de corpo de prova para ensaio de barras confinadas. ....	46

Figura 18 - Modelo de corpo de prova para ensaio de barras confinadas. ....	47
Figura 19 – Leiaute do corpo de prova para ensaio de arrancamento direto, dimensões em mm. ....	59
Figura 20 - Equipamentos utilizados no ensaio POT. ....	60
Figura 21 - Forma para ensaio de barras confinadas.....	61
Figura 22 - Máquina e corpo de prova no ensaio de barras confinadas.....	62
Figura 23 - Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado e natural. ....	65
Figura 24 - Separação manual dos fragmentos da amostra. ....	66
Figura 25 - Composição do agregado reciclado por análise visual. ....	67
Figura 26 - Resistência à compressão dos CP's referente ao Traço 1.....	68
Figura 27 - Abatimento concreto Traço 2. ....	69
Figura 28 - Resistência à compressão dos CP's referente ao Traço 2.....	70
Figura 29- Caracterização do concreto quanto à resistência à compressão, utilizado nos ensaios de barras confinadas e POT. ....	71
Figura 30 - Caracterização do concreto quanto à resistência à tração, utilizado nos ensaios de barras confinadas e POT. ....	71
Figura 31- Caracterização do concreto quanto ao módulo de elasticidade estático, utilizado nos ensaios de barras confinadas e POT. ....	72
Figura 32 - Tensão de aderência obtida no ensaio de barras confinadas.....	74
Figura 33 - Gráfico de Tensão de aderência versus a resistência à tração do concreto.....	75
Figura 34 - Gráfico tensão versus deslizamentos para amostra REF. ....	76
Figura 35 – Gráfico de tensão versus deslizamentos para amostras AR25.....	77

Figura 36 - Gráfico tensão versus deslizamentos para amostras AR50.....	77
Figura 37 - Gráfico tensão versus deslizamentos para amostras AR100.....	78
Figura 38 - Tensão de aderência versus porcentagem de adição de agregado reciclado.....	79
Figura 39 - Gráfico comparativo dos resultados de tensão de aderência obtidos nos ensaios de barras confinadas e <i>POT</i> . ....	80

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Tensão média da resistência à compressão simples e da aderência. ....	49
Tabela 2 - Ensaios para caracterização do agregado graúdo reciclado.....	52
Tabela 3 - Dosagem de concreto para produção do traço. ....	53
Tabela 4 - Número de corpos de prova por ensaio. ....	63
Tabela 5 - Caracterização do agregado reciclado.....	66
Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de barras confinadas.....	73
Tabela 7 - Tensão de aderência obtida pelo ensaio de barras confinadas. ....	74

## LISTA DE SIGLAS

RCD - Resíduo de Construção e Demolição

RSU - Resíduo Sólido Urbano

RCC - Resíduos da Construção Civil

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

SLU - Superintendência de Limpeza Urbana

POT - Pull Out Test

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

SINDUSCON - Sindicato da Indústria da Construção Civil

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

**LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

a/c – Fator água/cimento

$A_S$  - Área da seção transversal da armadura

$A_{lat}$  - Área de atuação de  $\tau_b$

C - Forças de compressão

cm - Centímetro

°C - Graus Celsius

d - Lado da seção do tirante;

$f_s$  - Tensão na armadura

$F_{ader}$  - Força de aderência

$f_t$  - Resistência à tração por compressão diametral do concreto

$\tau_b$  - Tensão de aderência

$F_{tu}$  - Força de tração última

$F_t$  - Força de tração

g - Gramas

h - Coeficiente de conformação superficial;

h - Horas

$\tau$  – Tensão de aderência

$\phi$  – Diâmetro da barra

kN - Quilo newton

kg - Quilo grama

L - Litro

$L_a$  – Comprimento de ancoragem

MPa – Mega Pascal

$m^3$  - Metro cúbico

m - Metro

mm - Milímetro

N - Newton

$\Delta l$  médio - Distância média entre fissuras considerando as quatro faces.

$\rho$  - Razão entre a área de aço ( $A_s$ ) e a área de concreto ( $A_c$ ).

P – Carga P aplicada

rpm - Rotações por minuto

$s_{ct}$  - Tensão de ruptura

$s_s$ -Tensão de tração na armadura

T - Força de tração;

$X_M$  - Espaçamento médio entre as fissuras;

z - Braço de alavanca interno;

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de se ter um reaproveitamento de resíduos é grande, já que locais para a disposição de resíduos estão escassos e as fontes naturais têm se esgotado a cada dia. Irá chegar-se o tempo em que a extração de matéria prima terá um custo de transporte que inviabilizará o projeto, mais do que o custo de transporte, há maior clareza quanto aos impactos ambientais decorrentes da obtenção de matéria prima. Além é claro, da urgência para melhor gestão dos resíduos. Os Resíduos de construção e demolição (RCD) representam aproximadamente, de 20 a 30% dos resíduos sólidos gerados por cidades em países desenvolvidos, podendo ser maiores nos demais (CHUNG E LO, 2003).

Nas cidades brasileiras e em países em desenvolvimento, o RCD representa de 40 a 70% em massa do montante de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados a indústria da construção civil consome cerca de 50% de todos os recursos naturais do país. A geração de resíduos da construção civil (RCC) é de aproximadamente 450 kg/habitante/ano, variando naturalmente de cidade a cidade e com a oscilação da economia. O gerenciamento desse material é oneroso e complexo e a tendência é que essa dificuldade aumente com na proporção do volume gerado. Locais para o descarte desses materiais estão sendo preenchidos e locais para implantação de novos aterros se tornando escassos e afastados dos centros comerciais (CARELI, 2008; PINTO, 1999; SINDUSCON-MG, 2008; TESSARO, 2012).

Por mais que haja uma constante reavaliação para o aperfeiçoamento dos processos construtivos, de forma a reduzir os custos e a quantidade de material desperdiçado, sempre haverá algo perdido. Por isso, existe a necessidade de se encontrar soluções para o problema dos resíduos, com formas práticas de reciclagem na própria obra ou em usinas apropriadas. A reciclagem pode introduzir no mercado um novo material com grande potencialidade de uso, transformando o entulho, novamente, em matéria-prima (WADA, 2010).

Na Europa, desde o ano 2000, já existem normas técnicas que dão subsídio à produção de concretos de 40 MPa com a utilização de agregado graúdo reciclado, por meio de um processo de britagem de resíduos de construção. Esta reciclagem inclui a britagem de tijolos e concretos para o uso como complemento em novos

materiais de construção ou como material de preenchimento de novas construções em substituição ao uso de brita. Na Alemanha, o uso de solo escavado e resíduo de demolição não contaminados, além de resíduos de construções de estradas, são utilizados como material de preenchimento em substituição à areia e à brita (BRODERSEN *et al.*, 2002).

Estudo realizado por Miranda (2009) demonstra que a triagem de RCD em canteiros de obra apresenta vantagens econômicas e ambientais, uma vez que reduz o volume de resíduos transportados e viabiliza soluções de reciclagem. O autor também destaca o crescimento das usinas de reciclagem após a vigência da Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e a falta de normas para garantir a homogeneidade dos agregados reciclados e sua aceitação no mercado. O custo do controle de qualidade é baixo e precisa ser implantado para melhorar a qualidade e confiabilidade do produto.

No Brasil, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2014) relata que foi coletado em 2014 aproximadamente 45 milhões de toneladas de RCD, sendo a região Sudeste responsável por cerca de 23 milhões de toneladas. Estes dados são apenas de obras sobre responsabilidade dos municípios e resíduos lançados nos logradouros públicos. Esse volume vem crescendo a cada ano e pouco se tem feito para se dar uma destinação final adequada ou reutilização.

O que torna os processos de reciclagem de RCD mal sucedidos, na maioria das usinas, é a falta de normas técnicas que sirvam de segurança para o consumidor quanto à qualidade do material. A falta de norma demanda o desenvolvimento de estudos e ações que explorem sobre a reciclagem desses materiais, para estabelecer apoio técnico e científico para criação de normas técnicas e medidas legislativas para incentivar a reutilização dos RCD (SALAZAR *et al.*, 2015).

A produção de concretos com até 100% de substituição do agregado graúdo natural atende os requisitos mínimos, de acordo com as normas cubanas, para utilização como concreto estrutural para ambientes cuja agressividade ambiental seja baixa. Porém, o que torna viável as construções em concreto armado é a propriedade de aderência aço-concreto, a interação que permite uma semelhança das deformações

que ocorrem nesse composto. Essa aderência é influenciada por diversos fatores, por isso a importância de se verificar as possíveis alterações com a mudança de agregados utilizados no concreto para assim se ter maior embasamento para tal utilização (PAVÓN, 2014; PORTO, 2015).

Já existem diversas pesquisas e até normas técnicas voltadas ao uso estrutural de concretos produzidos com RCD (BRASILEIRO E MATOS, 2015). Porém a maior parte destes estudos é baseado no comportamento à compressão destes concretos. Por outro lado, não se utiliza concreto para fins estruturais sem reforço de aço. Este estudo pretende verificar o comportamento da aderência entre aço e concretos produzidos com agregado graúdo reciclado, por meio de ensaio de arrancamento e barras confinadas.

## **1.1. PERGUNTA DA PESQUISA**

Concretos produzidos com agregado graúdo reciclado sofrem alteração na tensão de aderência existente entre o aço e o concreto?

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

O objetivo deste estudo é verificar a influência da aderência entre aço e concreto quando o agregado graúdo natural for substituído por agregado graúdo reciclado, na proporção de 25%, 50% e 100% de substituição, desde que o mesmo apresente resistência à compressão superior a 25MPa.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar o agregado graúdo reciclado produzido pela estação de reciclagem de entulho da SLU BR-040.
- Avaliar o teor de substituição (0%, 25%, 50%, e 100%) do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado nas propriedades mecânicas e de aderência.
- Verificar atendimento dos resultados com parâmetros normativos.

### **1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA**

O presente estudo se justifica, por contribuir para uma melhor compreensão dos efeitos na aderência aço concreto, com a utilização de materiais reciclados no traço do concreto e para contribuir para uma futura normalização desse procedimento para fins estruturais, uma vez que, a maioria das estruturas de concreto é reforçada com aço, e o que garante a estabilidade dessas estruturas é a aderência entre a barra de aço e o concreto.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

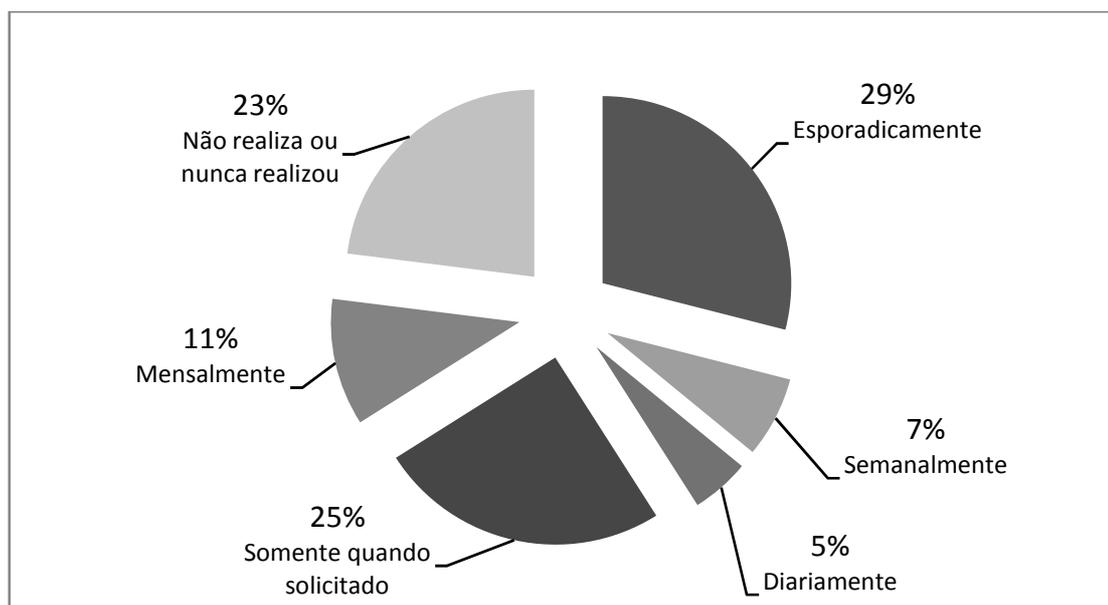
### 2.1. Resíduos de construção e demolição

A implantação de tratamento de RCD evita a exploração de agregados naturais, obtendo maiores rendimentos e, conseqüentemente, economia de energia e diminuição da contaminação atmosférica e do ambiente, incentiva a destinação adequada dos resíduos e evita a deposição dos mesmos em aterros ilegais. Um dos resultados mais significativos é a participação ativa e o desenvolvimento da comunidade, através da identificação e envolvimento de cada gerador (PORRAS *et al.*, 2013).

Afim de agregar valor aos resíduos e reduzir o consumo de agregados naturais, foi estabelecido um objetivo para 2020 em nível europeu, tal como descrito na diretiva nº 2008/98/CE: 70% dos resíduos de construção e demolição (excluindo solos e substâncias perigosas) terão de ser reutilizados ou reciclados (EUROPEAN PARLIAMENT, 2006).

No Brasil a primeira usina de reciclagem de RCD foi inaugurada em 1991 na cidade de São Paulo (SP). Em seguida também foram criadas novas centrais de beneficiamento de resíduos de construção e demolição em Londrina (PR) no ano de 1993 e em Belo Horizonte (MG) em 1995, até o ano de 2002 o Brasil contava com 16 usinas de beneficiamento de RCD e possuía uma taxa de crescimento de até três usinas inauguradas por ano no país. Com a Publicação da Resolução Conama 307 e como exemplo de gestão pública bem sucedida, em Belo Horizonte, esta taxa aumentou para nove usinas instaladas por ano. Até o final de 2015 foram listadas mais de 100 usinas de reciclagem no Brasil. Apenas 10% das usinas são públicas, o que demonstra a falta de incentivo do governo federal. Também a uma falta de controle e triagem nas usinas o que gera reciclados de baixa qualidade, já que apenas 52% dos reciclados são totalmente triados e apenas 5% das usinas realizam ensaios diariamente, conforme demonstrado na Figura 1 (ABRECON, 2016).

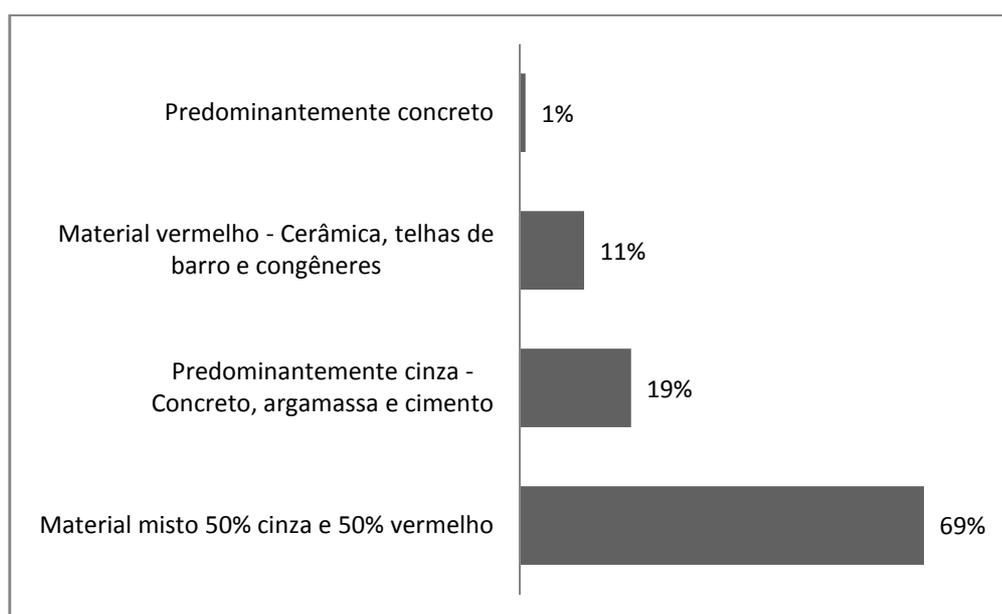
Figura 1- Frequência com que as empresas realizam ensaios técnicos nos produtos.



Fonte: Adaptado ABRECON, 2016

Dos resíduos que chegam às usinas, 19% são predominantemente cinza, composto de concreto, argamassa e cimento, resíduo que tende a ter melhor qualidade e já é utilizado em outros países na produção de concretos estruturais, conforme Figura 2 (ABRECON, 2016).

Figura 2 - Composição dos RCD que chegam as usinas.



Fonte: Adaptado ABRECON, 2016.

Esses fatos demonstram que pode-se ter agregados reciclados de excelente qualidade, porém há pouco incentivo, inexistência de legislação que estimula o consumo desse material e falta de conhecimento do mercado (ABRECON, 2016).

Em Belo Horizonte a usina de reciclagem da BR-040, antes do RCD ser britado e separado em diferentes granulometrias, o material é inspecionado para se verificar o grau de contaminação, onde o material aceito é classificado em: Classe A - Resíduos de peças fabricadas em concreto (lajes, pilares, blocos, pavimentação) e Classe B - Resíduos predominantemente cerâmicos (tijolos, telhas, azulejos). Os materiais recicláveis são separados manualmente dos rejeitos que, se forem reaproveitáveis, serão devidamente destinados para reciclagem em seguida os resíduos são levados pela pá carregadeira até o alimentador vibratório do britador de impacto e, por gravidade, para a calha simples e ao transportador de correia. Após a britagem, há eliminação de pequenas partículas metálicas ferruginosas pela ação de um eletroímã sobre o material reciclado conduzido pelo transportador de correia (SINDUSCON-MG, 2008).

Os agregados reciclados, além de apresentarem custo de produção inferior ao dos agregados naturais, promovem um “ganho ambiental”, já que deixa-se de extrair matéria-prima natural e dá-se um destino final a este tipo de resíduo que tem uma elevada participação no RSU. A barreira que torna os processos de reciclagem de RCD malsucedido na maioria das cidades é a falta de normas técnicas, aprovadas por estudos e pesquisas científicas, que recomendem o uso de materiais obtidos a partir do processamento do entulho da construção civil, e forneçam segurança para o consumidor quanto à qualidade do material e sua utilização. A falta dessas ferramentas exige o desenvolvimento de estudos e ações que incidem sobre a reciclagem desses materiais, a fim de estabelecer todo o apoio técnico e científico que irá gerar normas técnicas e medidas legislativas para incentivar e garantir a reutilização, reciclagem e uso do RCD. Uma forma de assegurar o desempenho e qualidade dos agregados de RCD, é a implantação de controle de qualidade, de forma a reduzir a variabilidade, de acordo com a sua aplicação (BRASILEIRO E MATOS, 2015; MELO, 2011; SALAZAR, 2015).

No Brasil o emprego dos agregados reciclados restringe-se a concretos não estruturais, o que interfere nas condições de produção de agregados com melhores

características tecnológicas por não haver normas e diretrizes que acarretem à certificação e à utilização valorizada. Esses fatos influem diretamente na qualidade dos agregados reciclados e, por este motivo, a utilização deste insumo ainda é considerada baixa, já que o setor industrial não consegue o controle completo do desempenho de materiais produzidos a partir deles (MELO, 2011; SALAZAR, 2015).

## **2.2. Agregados reciclados**

O RCD usado na produção de agregados reciclados é classificado de acordo com sua composição, basicamente, em três grupos (de concreto, cerâmica e mista). Os agregados reciclados, dependendo da sua composição e propriedades físico-mecânicas, podem ser usados em substituição total ou parcial dos agregados graúdos na fabricação de concretos (PAVÓN *et al.*, 2014).

Ao diminuir a porcentagem de cerâmica vermelha nos agregados de RCD mistos, tem-se um agregado reciclado composto essencialmente de concreto, cuja absorção de água varia entre 4% e 7%. Teores de até 5% de cerâmica vermelha nos agregados de RCD mistos brasileiros são esperados. Nesse caso, a produção de concretos estruturais (20 a 30 MPa) com incorporação de agregados reciclados torna-se viável (ANGULO *et al.*, 2013).

Lovato (2007) em pesquisa feita na cidade de Porto Alegre apresenta os constituintes dos RCD em dois grupos: o primeiro, cerâmica e argamassa; e o segundo, concreto e rocha. O autor verificou que 80% dos resíduos são compostos de material cerâmico e argamassa, materiais porosos que demandam mais água durante a produção de concretos com agregados reciclados.

A composição do resíduo de construção é de muita importância, e deve ser dada atenção à existência de materiais contaminantes, pois esses materiais que podem provocar efeitos negativos tanto nas propriedades do concreto produzido como em na sua durabilidade. Contaminantes são todos os materiais minerais não inertes ou materiais que prejudicam a qualidade de concretos e argamassas: cloretos, sulfatos, matéria orgânica, produtos industrializados leves (papel, plástico, tecido, borracha), vidro, betume, vegetação, terra, gesso, madeira e outros. Alguns materiais, mesmo inertes (como solo, madeira, asfalto e outros), levam a prejuízos quanto à resistência à compressão, e algumas normas estrangeiras (LNEC, 2006) estabelecem teores de

contaminação admissíveis. Também deve-se evitar partículas que sofrem reações álcali-agregado e materiais que podem gerar expansão no concreto (óxidos de magnésio ou de ácido) ou que podem levar diferença na cor do concreto (ferro e vanádio). Um dos materiais mais prejudiciais no material reciclado é o gesso, que pode levar à ocorrência de expansão no concreto devido aos sulfatos. Várias normas de reciclado estabelecem limites ao conteúdo de sulfatos. A presença de cloretos no reciclado pode levar à corrosão de armaduras (LEITE, 2001; LIMA, 1999).

Quanto maior o teor de substituição do agregado reciclado, menor a massa específica do concreto. A redução da massa específica causada pelo agregado graúdo reciclado é muito maior que a redução causada pelo agregado miúdo reciclado. Fato que comprova a influência do tamanho das partículas sobre a massa específica. Outro fator que contribui para redução da massa específica do concreto é que os valores da massa específica dos agregados reciclados são menores do que a dos agregados naturais. A existência de uma tendência dos concretos com agregados reciclados apresentarem perdas de abatimento mais elevadas que concretos convencionais, principalmente nos instantes iniciais. Para minimizar esse efeito deve-se trabalhar com índices de abatimento um pouco maiores para concretos com agregados reciclados (LEITE, 2001).

Tenório *et al.* (2012) também observa que a água absorvida na mistura a partir dos agregados precisa ser controlada; a densidade do agregado graúdo reciclado pode ser um parâmetro para a seleção dos agregados reciclados com finalidade estrutural. Os autores também demonstram que a resistência à compressão foi de aproximadamente 20 MPa para o fator  $a/c = 0,67$ , 30 MPa para o fator  $a/c = 0,50$  e foi de aproximadamente 40 MPa para o fator  $a/c < 0,40$ . Este comportamento ocorreu independentemente do tipo de agregado utilizado, e, portanto, indica que todos os concretos obedecem a Lei Abrams, que demonstra que quanto maior a relação água cimento, menor a resistência (TENÓRIO *et al.*, 2012).

A substituição de 100% do agregado graúdo natural por reciclado em concretos, não altera a resistência à compressão, tão pouco a durabilidade do concreto quanto à corrosão das armaduras. No entanto, é preciso que se de importância para o tratamento dos resíduos, desde o beneficiamento e caracterização, até a utilização

do agregado reciclado no concreto. Conhecendo as propriedades do agregado reciclado a sua utilização não fica limitada (VIEIRA *et al.*, 2004).

As propriedades de resistência à compressão e as relacionadas à durabilidade dos concretos indicam geralmente melhor desempenho nos concretos com agregado graúdo reciclado de maior densidade, em comparação com os concretos com agregado reciclado de menor densidade, independente do tipo de agregado fino. Os concretos com agregado miúdo reciclado normalmente tiveram suas propriedades inferiores a um dos concretos com agregados finos natural (TENÓRIO *et al.*, 2012).

Os concretos produzidos com agregado graúdo reciclado sem utilização de aditivos plastificantes, são mais porosos e permeáveis que os concretos convencionais. Os concretos mais porosos e permeáveis tendem a ser menos duráveis para proporcionar, no caso das aplicações estruturais, a proteção para o aço contra agentes agressivos externos que podem penetrar no composto. No entanto, isto só virá a ser um fator limitativo para o uso desses concretos no caso em que as estruturas forem aparentes. A Norma Brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) de estruturas de concreto menciona que os revestimentos podem ser aplicados sobre o concreto no intuito de proteger o material das condições ambientais nocivas (TENÓRIO *et al.*, 2012).

Brito *et al.* (2016) avaliou se a mudança de ambiente de laboratório, onde se tem mais estudos de RCD, para um ambiente de construção real produziria mudanças significativas nos resultados. O experimento verificou se peças pré-moldadas de concreto que foram rejeitadas poderiam ser utilizadas em novas misturas de concreto, onde foi estudado apenas a incorporação do agregado graúdo.

Após processo de britagem do material, Brito *et al.* (2016) pode concluir que a densidade dos resíduos é menor que a do agregado natural e a absorção de água é significativamente maior. Porém, essas propriedades são muito mais semelhantes às propriedades dos agregados naturais do que a maioria dos agregados reciclados estudados até a data. Pode-se concluir que as propriedades de agregados provenientes apenas de concreto são melhores do que agregados mistos ou provenientes de alvenaria. Tal estudo também comprovou que o concreto produzido com 100% de agregado graúdo reciclado tem maior compacidade ao utilizar aditivo

superplastificante. O autor, produziu concretos com resistência à compressão da ordem de 70 MPa com 100% de substituição do agregado graúdo natural. O módulo de elasticidade sofreu redução da ordem de 10% para as amostras de concreto com 25% e 100% (sem aditivo superplastificante) de substituição do agregado graúdo natural, já a amostra com 100% de substituição do agregado graúdo natural com aditivo superplastificante apresentou um módulo de elasticidade maior do que o concreto de referência, devido à baixa relação a/c. Nos ensaios de absorção de água, os concretos com agregado reciclado tiveram aumentos significativos nos ensaios de imersão e absorção capilares. Apesar de significativos, os resultados foram menores na maioria dos estudos devido à qualidade do agregado reciclado. Esse estudo também demonstrou aumento da resistência à abrasão com a incorporação do agregado reciclado, o concreto com 100% de substituição do agregado sem plastificante teve uma redução, em 91 dias, cerca de 16% maior que o concreto de referência, porém a amostra com aditivo superplastificante teve uma redução significativamente menor, cerca de 38%, diferente de estudos que demonstram que a incorporação de RCD provoca aumento na retração do concreto. As amostras desse estudo tiveram efeitos insignificantes quanto à resistência à carbonatação, o que pode ser justificado devido à qualidade dos RCD. Ao analisar a resistência à penetração de cloretos, também pode-se observar resultados muito semelhantes ao concreto de referência.

Soares *et al.* (2014) também relata a diminuição linear da densidade do concreto com o aumento do índice de substituição do agregado natural. Porém, com a redução do fator a/c causado pela adição de superplastificantes, a porosidade também reduziu, conseqüentemente, a densidade aumentou. Não foram identificadas alterações nas resistências à compressão das amostras, a diferença máxima de resistência nos concretos com 10% a 100% de substituição do agregado natural foi de 4 MPa, não sendo considerado significativo. O mesmo comprova o aumento de desempenho na resistência e em outras propriedades com o uso de superplastificantes. Os agregados graúdos gerados a partir de elementos pré-moldados com o uso de superplastificantes abrem novas perspectivas para agregados reciclados de concreto, possibilitando a produção de concretos de alto desempenho.

Em Portugal, o uso de concretos estruturais com adição de 25% de agregado reciclado já é utilizado desde 2006, para agregados que possuem no mínimo 90% de resíduos de concreto (LNEC, 2006).

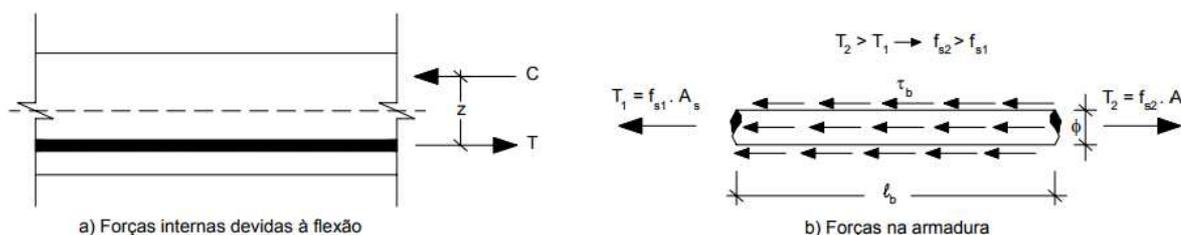
Estudos realizados em Cuba demonstram que concretos produzidos com 50% de agregados graúdos reciclado em substituição aos agregados naturais podem ser utilizados de acordo com as suas propriedades mecânicas em ambientes agressivos médios, como definido pelos regulamentos em Cuba. Concretos feitos com 100% de agregado graúdo reciclado alcançam, de acordo com as normas cubanas, os requisitos mínimos para a sua utilização como concreto estrutural para a utilização em ambientes que a classe de agressividade ambiental é considerada baixa (PAVON *et al*, 2014).

Leite (2001) demonstra que o aumento do teor de substituição do agregado graúdo reciclado diminui a resistência à compressão, sua maior porosidade e menor resistência são fatores preponderantes para redução da resistência à compressão do concreto característica ( $f_{ck}$ ). O mesmo também observa que aproximadamente 87% da resistência total aos 28 dias é alcançada aos 7 dias. Isso demonstra a rápida evolução da hidratação do concreto com a utilização do agregado reciclado, que se deve à taxa de absorção mais alta do agregado, que diminui a quantidade de água na mistura, fazendo com que os cristais de etringita de hidróxido de cálcio formados cresçam menos, tornando a pasta mais densa. Aos 91 dias a resistência do concreto tende a aumentar 38% em relação aos 28 dias. Isso demonstra que existe um possível efeito retardador de hidratação no concreto com agregado reciclado. Pode-se supor que o alto índice de absorção do agregado reciclado contribui para que se tenha um efeito de cura interna tardia no concreto. Quando toda água já foi combinada, ainda existe água presente no agregado, que pode estar disponível para que as reações de hidratação continuem acontecendo. O autor também afirma que a trabalhabilidade satisfatória pode ser obtida para o concreto com agregado reciclado utilizando proporções de mistura equivalente usando o agregado graúdo reciclados de concreto na condição de saturado. No entanto, a resistência à compressão diminuiu com o aumento da porcentagem de substituição do RCD.

### 2.3. Aderência aço-concreto

A aderência entre aço e concreto em uma estrutura de concreto armado é tão importante quanto a resistência à compressão do concreto. A existência do concreto armado é a consequência da solidariedade dos seus materiais constituinte: aço e concreto. A propriedade do aço de resistir à tração em conjunto com a propriedade do concreto de resistir à compressão garante um equilíbrio das peças de concreto, mas para que isso ocorra é preciso que se tenha uma transferência dos esforços entre os elementos, essa interação entre os dois materiais é fundamental para que não se tenha um escorregamento relativo de um em relação ao outro, propriedade que é garantida pela tensão de aderência entre os dois materiais a Figura 3 apresenta como ocorre o equilíbrio de tensões dos materiais (NEVILLE, 1997; DUMÊT, 2003).

Figura 3 - Surgimento da tensão de aderência.



Fonte: DUMÊT, 2003, p. 37.

A força de aderência ( $F_{ader}$ ) aparece para equilibrar a diferença ( $T_2 - T_1$ ). Montando a equação de equilíbrio para as forças horizontais, tem-se:

$$\begin{aligned}
T_2 - T_1 &= F_{ader} \\
\text{sendo: } F_{ader} &= \tau_b \cdot A_{lat} \\
A_{lat} &= \pi \cdot \phi \cdot l_b \\
f_{S2} \cdot A_s &= f_{S1} \cdot A_s + \tau_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot l_b \\
\text{sendo: } A_s &= \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \\
\Delta f_s = f_{S2} - f_{S1} &= \frac{4 \cdot \pi \cdot \phi \cdot l_b \cdot \tau_b}{\pi \cdot \phi^2} = \frac{4 \cdot l_b \cdot \tau_b}{\phi}, \text{ ou} \\
\tau_b &= \frac{\Delta f_s \cdot \phi}{4 \cdot l_b}
\end{aligned} \tag{2.1}$$

onde: T = Força de tração;

C = Forças de compressão;

z = braço de alavanca interno;

$f_s$  = tensão na armadura;

$A_s$  = área da seção transversal da armadura;

$\tau_b$  = tensão de aderência;

$A_{lat}$  = área de atuação de  $\tau_b$ ;

$\phi$  = diâmetro da barra;

Para um elemento cujo comprimento for infinitesimal  $dx$ , pode-se reescrever a equação da seguinte forma:

$$\frac{\Delta f_s}{dx} = \frac{4 \cdot \tau_b}{\phi}, \tag{2.2}$$

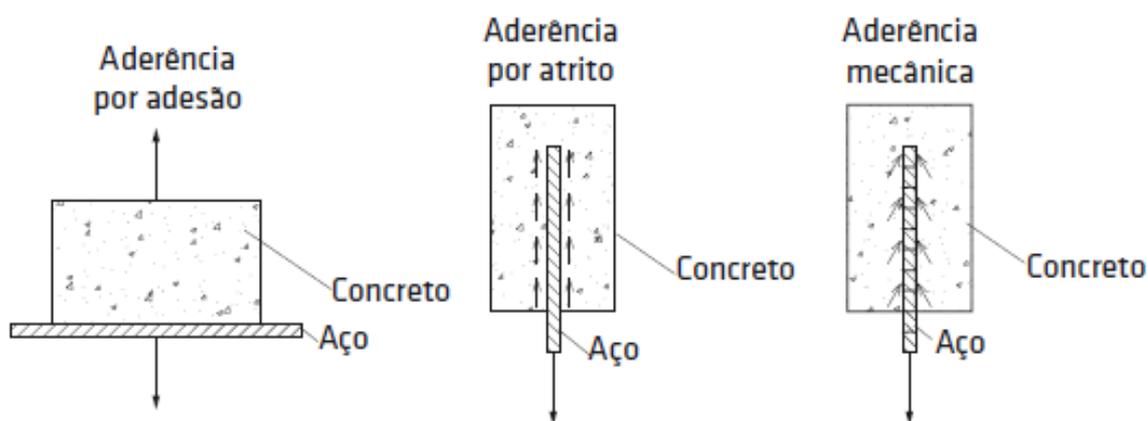
Portanto, sob tensão constante, a peça de concreto esta em equilíbrio e não há tensão de aderência, porém quando ocorrer variação da tensão vai existir uma força de aderência para equilibrar a peça e conseqüentemente a transferência dos esforços entre os materiais. A ligação e o equilíbrio de tensões entre esses dois materiais é importante tanto em relação ao comportamento da estrutura, como em

relação a fissuração provocada pela retração e aos efeitos térmicos (NEVILLE, 1997; DUMÊT, 2003).

#### 2.4. Tipos de aderência

A aderência é composta por diversas parcelas, as quais decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação dos dois materiais: aço e concreto. Esses fenômenos podem ser explicitados por meio de diferentes ensaios. Esquemáticamente podem ser consideradas as seguintes parcelas: aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica, conforme demonstrado na Figura 4. A separação da aderência nas três parcelas indicadas é meramente esquemática, não sendo possível determinar cada uma delas isoladamente. A aderência de uma barra de aço ao concreto que a envolve é fortemente influenciada pela retração, deformação lenta e fissuração do concreto. Dessa forma, por meio de ensaios, são determinados valores médios globais de aderência (ARAÚJO *et al.*, 2013; FUSCO, 2013; NEVILLE, 1997; PORTO, 2015):

Figura 4 - Tipos de aderência aço-concreto.



Fonte: PORTO, 2015, p. 55.

**Aderência por adesão:** essa parcela de aderência é constatada pela resistência à separação dos dois materiais, em virtude das ligações físico-químicas que se estabelecem na interface dos dois materiais durante as reações de pega do cimento, surge uma certa resistência de adesão que se opõe à separação dos materiais (ARAÚJO *et al.*, 2013; FUSCO, 2013; PORTO, 2015).

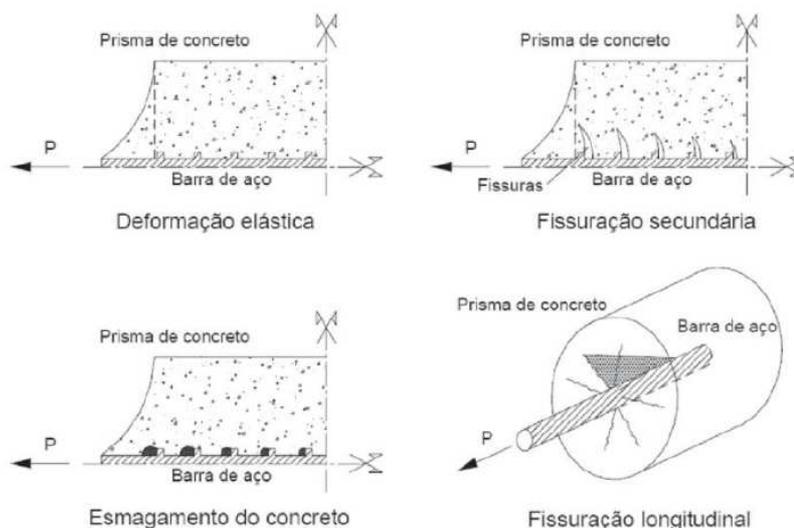
Aderência por atrito: a força de atrito depende do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, o qual é função da rugosidade superficial da barra, e decorrem da existência de uma pressão transversal exercida pelo concreto sobre a barra, em virtude de sua retração. A barra de aço inibe parcialmente as deformações de retração do concreto, o que provoca pressão transversal e acréscimo de aderência. Em barras curvas, sob ação de forças de tração, surgem elevadas pressões de contato, fator que favorece a junção dos dois materiais. Da mesma forma, uma compressão transversal externa aumenta a capacidade de aderência por atrito. O ensaio de arrancamento direto de uma barra de aço imersa parcialmente no concreto comprova que a força de arrancamento é significativamente superior aos limites que podem ser previstos a partir da resistência obtidos na aderência por adesão (ARAÚJO et al., 2013; FUSCO, 2013; PORTO, 2015).

Aderência mecânica: é decorrente da presença de saliências na barra, essas funcionam como peça de apoio e transmitem tensões de compressão para o concreto. Nas barras de alta aderência, essas saliências são chamadas de nervuras e são dispostas intencionalmente ao longo da superfície da barra. A interação dessas barras ao concreto é baseada essencialmente na aderência mecânica resultante dessas nervuras, as quais caracterizam a conformação superficial de tais barras. No entanto, o efeito da aderência mecânica também está presente nas barras lisas, em virtude de irregularidades superficiais inerentes ao processo de laminação (ARAÚJO et al., 2013; FUSCO, 2013; PORTO, 2015).

## **2.5. Tipos de ruptura**

A ruptura da aderência pode ocorrer por deformação elástica, fissuração secundária, fissuração por fendilhamento longitudinal e esmagamento do concreto. A Figura 5 demonstra os quatro tipos de ruptura citados. As rupturas por deslizamento e arrancamento de uma forma geral são frágeis, por estarem relacionadas a propriedades do concreto, quando o comprimento de ancoragem é grande o suficiente para impedir essas rupturas o colapso se dá pelo escoamento do aço, chamado de ruptura dúctil (ALMEIDA FILHO, 2006).

Figura 5 – Tipos de ruptura da aderência.

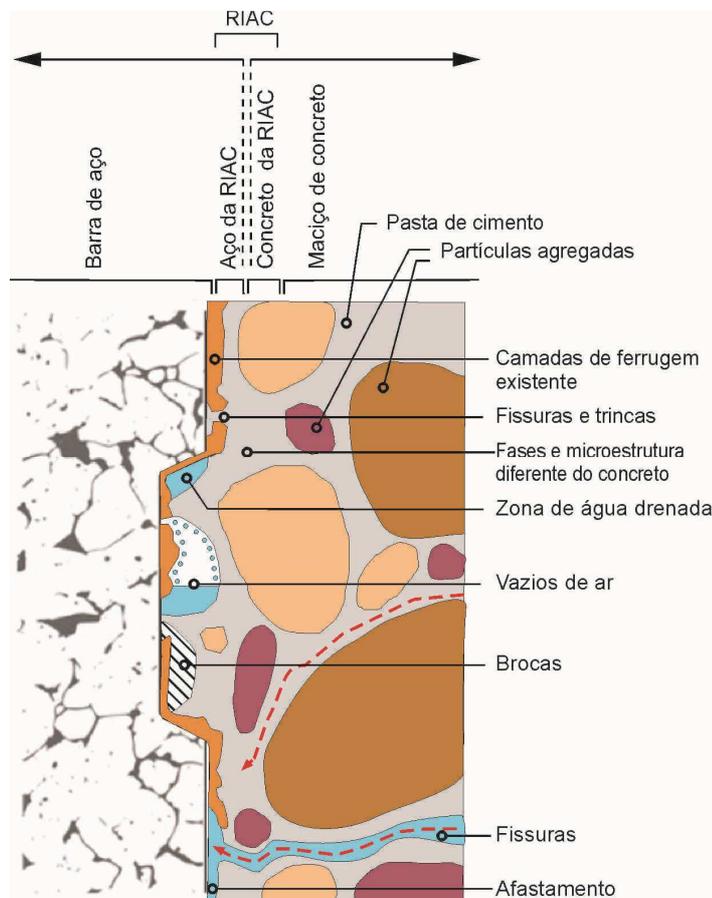


Fonte: ALMEIDA FILHO, 2006.

## 2.6. Fatores que influenciam a aderência

A região de interface aço-concreto (RIAC) exibe uma heterogeneidade espacial significativa ao longo, ao redor e perpendicularmente à barra de aço em termos de composição do material e propriedades físicas e químicas. As propriedades dessa região mudam continuamente em função das condições de exposição, carregamento e idade do concreto. Estruturas construídas antes e depois da década de 70 e 80 possuem comportamentos diferentes devido à evolução da tecnologia de produção de concretos e da fabricação das barras de aço. Ensaio de laboratório apresentam diferenças significativas em comparação com as estruturas, já que os procedimentos de limpeza da superfície do aço, a ausência de fissuras no concreto e a longa exposição de agentes agressivos que promovem a corrosão do aço. A Figura 6 apresenta de forma esquemática características que podem estar presente na interface aço-concreto e influenciam diretamente a tensão de aderência. As linhas tracejadas indicam vias preferenciais para entrada de cloretos, os pontos azuis representam água adsorvida (ANGST, 2017; TORRE-CASANOVA *et al.*, 2013).

Figura 6 - Ilustração esquemática de características da interface aço-concreto.



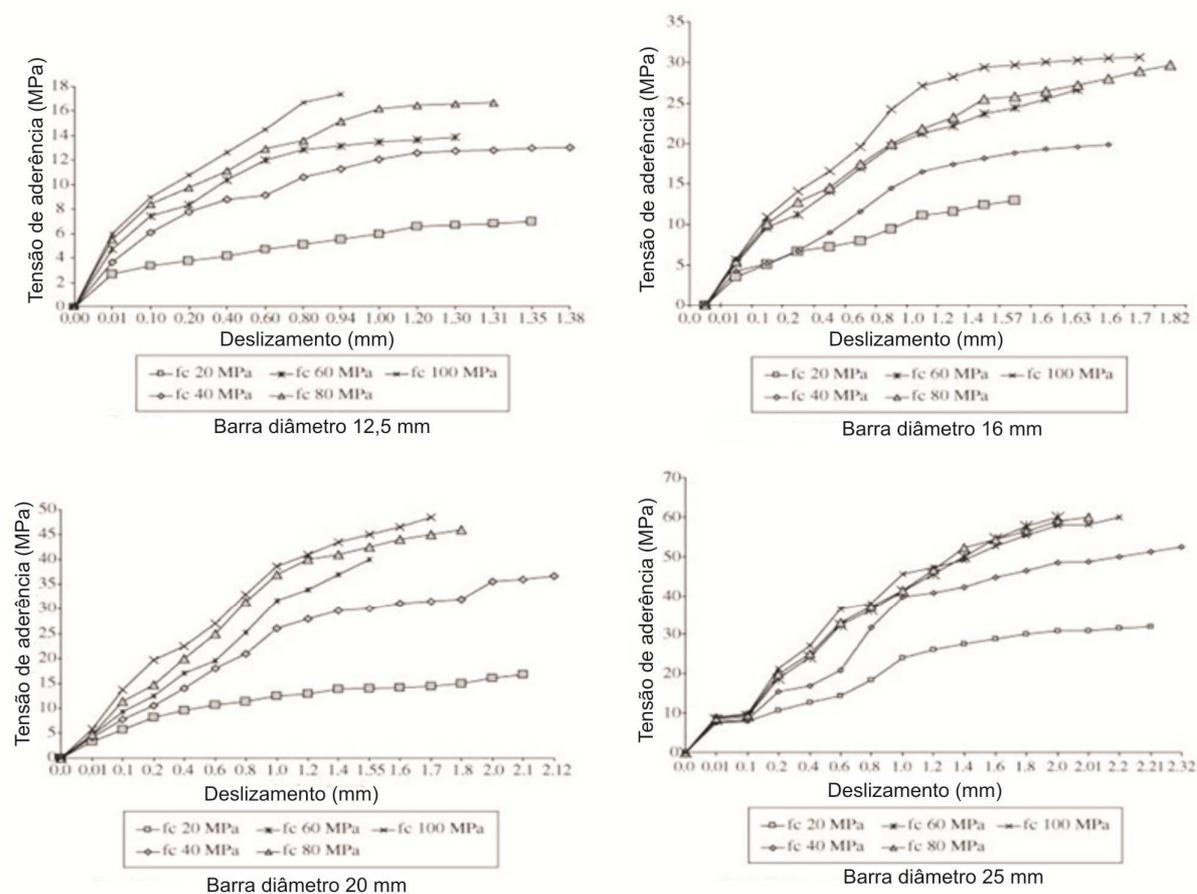
Fonte: Adaptado, ANGST, 2017.

Observa-se uma melhor aderência quando se diminui a relação a/c e a quantidade de agregado miúdo, portanto, quando se aumenta a quantidade de agregado graúdo. Outro fator importante é que quanto maior a idade do corpo de prova maior a aderência entre os materiais, pois a ruptura da aderência ocorre por fendilhamento do recobrimento, que está relacionado diretamente com a resistência à tração do concreto. O aumento da qualidade do concreto leva a uma maior aderência, uma vez que a resistência à tração do concreto é o principal fator que determina a carga última de aderência quando a ruptura se dá por fendilhamento, e a resistência à compressão do concreto é o fator preponderante no caso em que a ruptura é devida ao arrancamento. A posição da barra influi na resistência ao arrancamento, as barras concretadas na posição horizontal no topo da forma apresentam pior comportamento do que aquelas no fundo da forma. Isto se deve ao fato de que as barras inferiores estão em uma zona em que o adensamento é mais acentuado, portanto, a existência de argamassa porosa na metade inferior da barra é menor. A

geometria do aço e o estado da superfície da barra que pode apresentar ferrugem também influenciam a ligação aço-concreto (MAULINE E ASTROVA *apud* RIBEIRO, 1985; RIBEIRO, 1985; SÖYLEV e FRANCOIS, 2006; NEVILLE, 1997).

Ao observar a Figura 7 verifica-se que os concretos de 20 MPa apresentam tensão de aderência máxima para barras de 12,5 mm de diâmetro de 6 MPa, enquanto que para barras de 25 mm de diâmetro a tensão de aderência máxima é da ordem de 30 MPa. Também pode-se notar que para as barras de 12,5 mm, 16 mm, 20 mm e 25 mm ao aumentar a resistência à compressão também ocorre um aumento da tensão de aderência, vejamos, para a barra de 12,5 mm de diâmetro a tensão de aderência para o concreto de 20 MPa é de 6 MPa, ao utilizar o concreto com resistência característica de 100 MPa a tensão de aderência passa a ser de 18 MPa. Pode-se concluir ao analisar esses resultados que a resistência à compressão e o diâmetro da barra, têm uma grande importância na determinação da tensão de aderência, quanto maior a resistência à compressão do concreto maior a resistência de aderência a mesma observação é válida no caso do diâmetro da barra, isto é, maior diâmetro significa maior resistência de aderência. A qualidade do concreto não é só a resistência à compressão, mas também suas propriedades em relação à trabalhabilidade no estado fresco, porosidade e quantidade de aditivos, fatores que também influenciam a tensão de aderência (BARBOSA *et al.*, 2008; DUMET, 2003; REYES, 2009; TAVARES *et al.*, 2014).

Figura 7 - Tensão de aderência versus o diâmetro da barra e resistência à compressão.

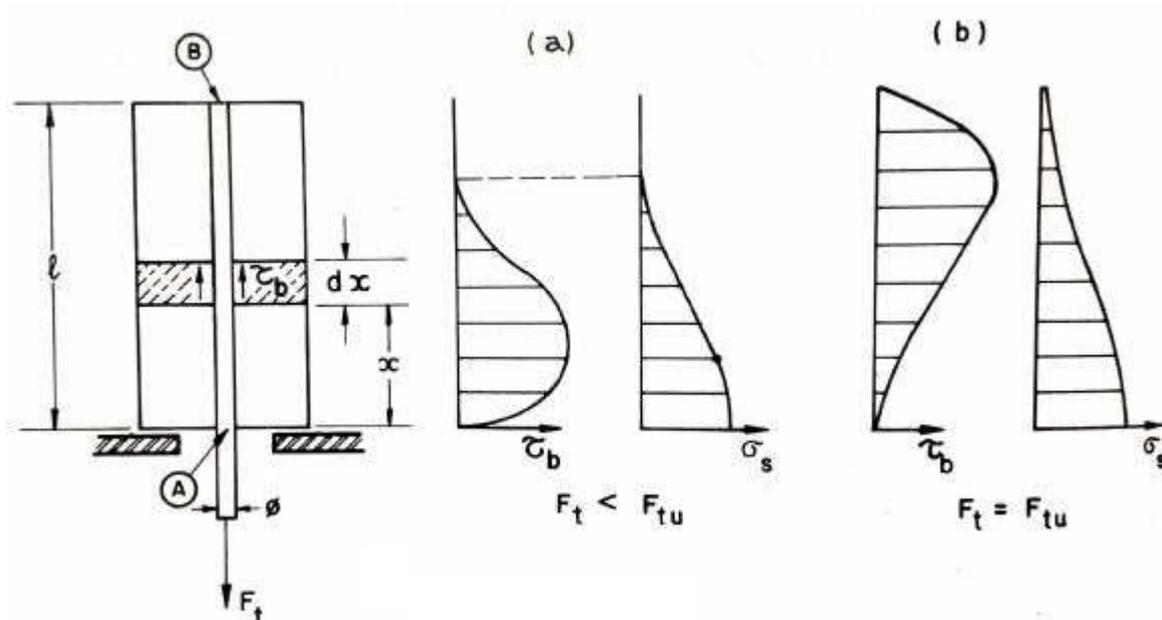


Fonte: Adaptado, BARBOSA *et al.* 2008.

## 2.7. Ensaios para determinação da tensão de aderência

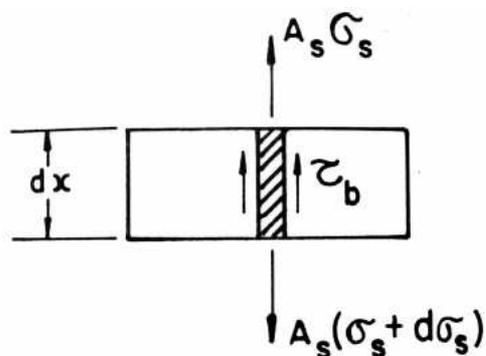
A determinação da resistência de aderência é classicamente realizada por meio do ensaio e arracamento, a distribuição de tensões apresenta configuração conforme indicado na Figura 8. A força  $F_t$  aplicada a uma barra de aço centralizada em um corpo de prova cúbico, gera tensões  $\sigma_s$  ao longo da barra que diminui à medida que se afasta do ponto de aplicação do carregamento. Considerando o equilíbrio do elemento de comprimento  $dx$ , conforme indicado na Figura 8 e Figura 9, sendo  $A_s$  a área da seção transversal da barra de aço,  $\varnothing$  o seu diâmetro e  $u = \pi \times \varnothing$  o seu perímetro, observa-se a Equação (2.3) (FUSCO, 2013).

Figura 8 - Ensaio de arrancamento.



Fonte: FUSCO, 2013.

Figura 9 - Formulação da tensão de aderência no ensaio de arrancamento direto.



Fonte: FUSCO, 2013.

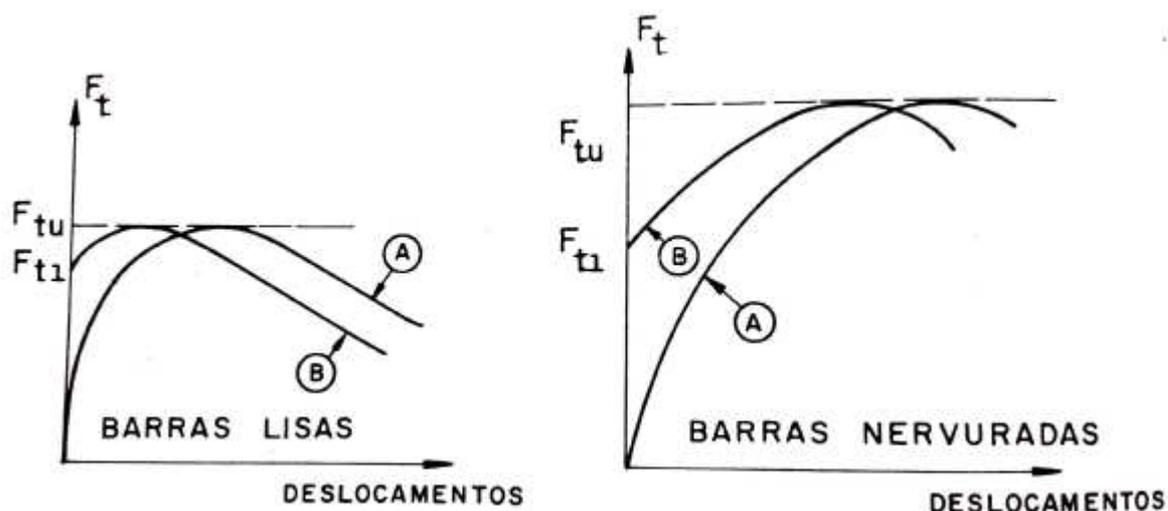
$$\tau_b \cdot u \cdot dx = A_s \cdot d\sigma_s$$

$$\text{logo, } \tau_b = \frac{A_s}{\pi \cdot \phi} \cdot \frac{d\sigma_s}{dx} \quad (2.3)$$

Nessas condições, a tensão de aderência atinge o seu valor máximo onde o diagrama de  $\sigma_s$  apresenta um ponto de inflexão, pois as duas condições  $d\tau/dx = 0$  e  $d^2\sigma_s/dx^2 = 0$  ocorrem na mesma seção, de acordo com a Equação (2.3). Quando se

tem uma força de tração  $F_t$  menor do que a força de tração última  $F_{tu}$ , a aderência será mobilizada somente quando  $d\sigma_s / dx \neq 0$ , isto é, quando  $\sigma_s$  não for constante. O arrancamento irá ocorrer quando  $F_t = F_{tu}$ , sendo a máxima capacidade de aderência entre os dois materiais. Antes que ocorra o arrancamento da barra, o bloco de concreto sofre um processo de fissuração, que evidencia o caráter progressivo do fenômeno de destruição das ligações existentes entre os dois materiais. Por essa razão, a força última  $F_{tu}$  não é determinada pela carga final de arrancamento, mas sim como a força correspondente a um determinado deslocamento da extremidade da barra. Determinando os deslocamentos da seção inicial "A" da barra, bem como os da seção terminal "B", indicado na Figura 8, se obtém os resultados demonstrados na Figura 10 (FUSCO, 2013).

Figura 10 - Comportamento das barras lisas/nervuradas no ensaio de arrancamento direto.

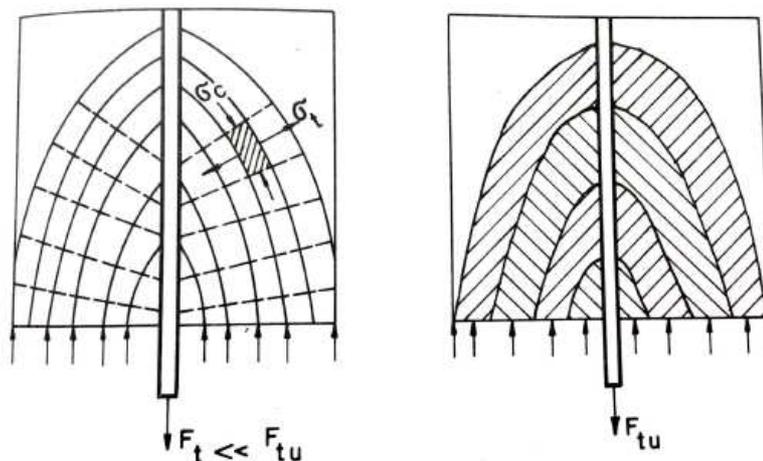


Fonte: FUSCO, 2013.

São observados deslocamentos da seção inicial de ancoragem desde o início do ensaio e que o escorregamento total da barra somente acontece a partir de uma determinada força. Depois de iniciado o escorregamento da barra, a força de aderência ainda pode aumentar. Esse aumento é pequeno para as barras lisas, sendo maior para barras nervuradas. Esse fato é explicável pela maior capacidade de aderência mecânica que as barras nervuradas possuem. Os resultados indicados na Figura 10 comprovam os diagramas de tensões apresentados na Figura 8, pois eles demonstram que a zona de aderência vai se propagando, à medida que cresce

a solicitação externa. No trecho que ocorre o deslizamento da barra, é destruída a aderência por adesão, restando a aderência por atrito e aderência mecânica. Admitindo um comportamento elástico da ancoragem, pode-se observar na Figura 11 a distribuição de tensões no concreto. Verifica-se que a ancoragem da barra provoca necessariamente o aparecimento de tensões de tração transversais à barra, essas podem conduzir a uma fissuração do concreto (FUSCO, 2013).

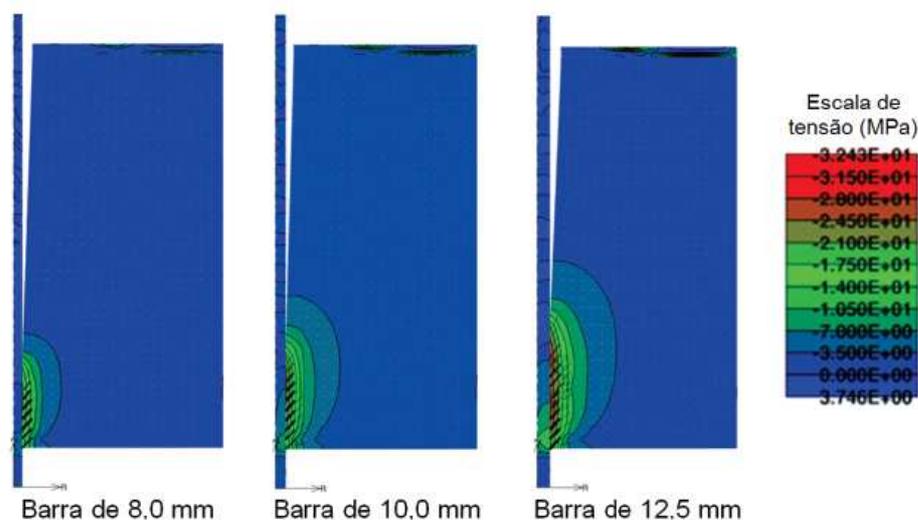
Figura 11 - Trajetória das tensões no ensaio de arrancamento direto.



Fonte: FUSCO, 2013.

Tavares *et al.* (2014) para conhecer o comportamento da aderência aço-concreto no ensaio *pull out* realizou uma simulação numérica utilizando um código de cálculo chamado ATENA que é baseado no método dos elementos finitos. A simulação permitiu uma análise da fissuração e da distribuição de tensões que ocorre durante o ensaio de arrancamento demonstradas na Figura 12.

Figura 12 - Distribuição de tensões e fissuração ensaio *pull-out*.

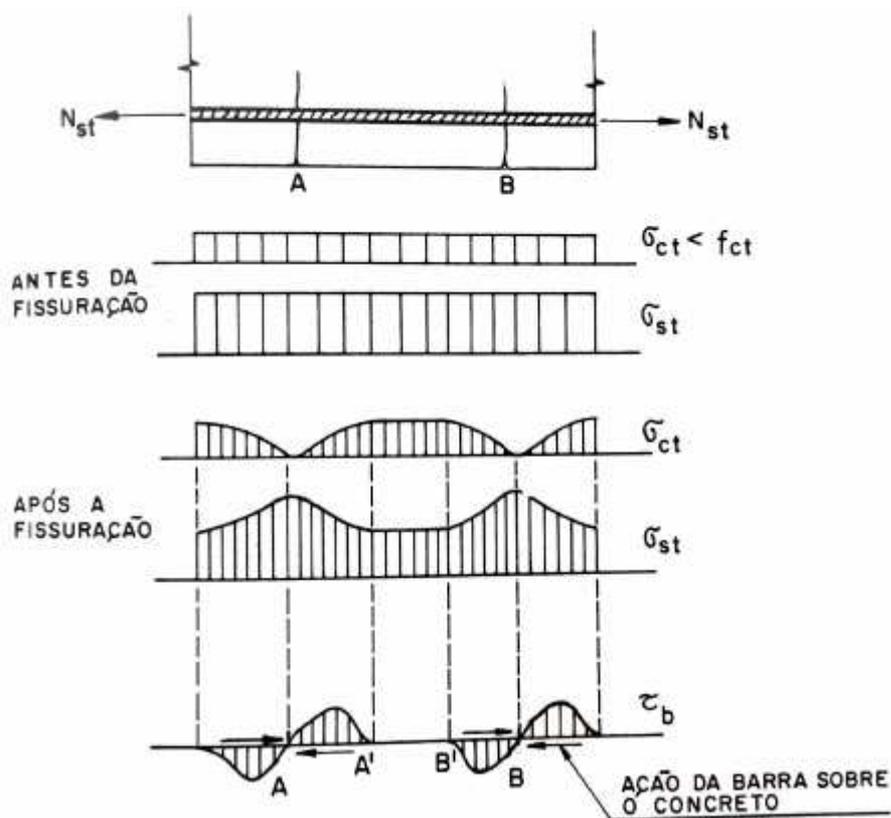


Fonte: TAVARES, 2014.

A validade do ensaio de arrancamento para determinação da capacidade de ancoragem das barras é por vezes contestada, em virtude das divergências existentes entre o panorama de tensões obtidas nesse tipo de ensaio e aquele correspondente às regiões de ancoragem das armaduras das peças de concreto armado. No ensaio de arrancamento, basicamente há uma compressão longitudinal do concreto. Essa compressão longitudinal não existe na zona de ancoragem da armadura de tração das vigas fletidas. Por essa razão frequentemente se sugere que a capacidade de ancoragem das barras seja determinada por meio de ensaios de vigas. Porém ao comparar os resultados obtidos com ensaios de arrancamento e com ensaios de vigas, empregando diferentes condições da superfície de barras, é verificado que os ensaios de arrancamento sempre fornecem os menores valores de aderência. Dessa forma, os resultados dos ensaios de arrancamento podem ser considerados como a favor da segurança (FUSCO, 2013).

Quando as solicitações de tração são baixas, ou seja, o concreto ainda é resistente à esses esforços, se diz que o concreto está no Estádio I. Ao aumentar as solicitação, as fibras mais tracionadas atingem a tensão  $\sigma_{ct}$  de ruptura do concreto à tração, ocorrendo então a fissuração da peça. O concreto entra no Estádio II. Com a passagem do Estádio I para o Estádio II, nas seções fissuradas a tensão de tração no concreto se anula,  $\sigma_{ct}=0$ , ocorrendo um aumento da tensão de tração na armadura  $\sigma_s$ , conforme indicado na Figura 13 (FUSCO, 2013).

Figura 13 - Tensões de tração nas seções fissuradas.



Fonte: FUSCO, 2013.

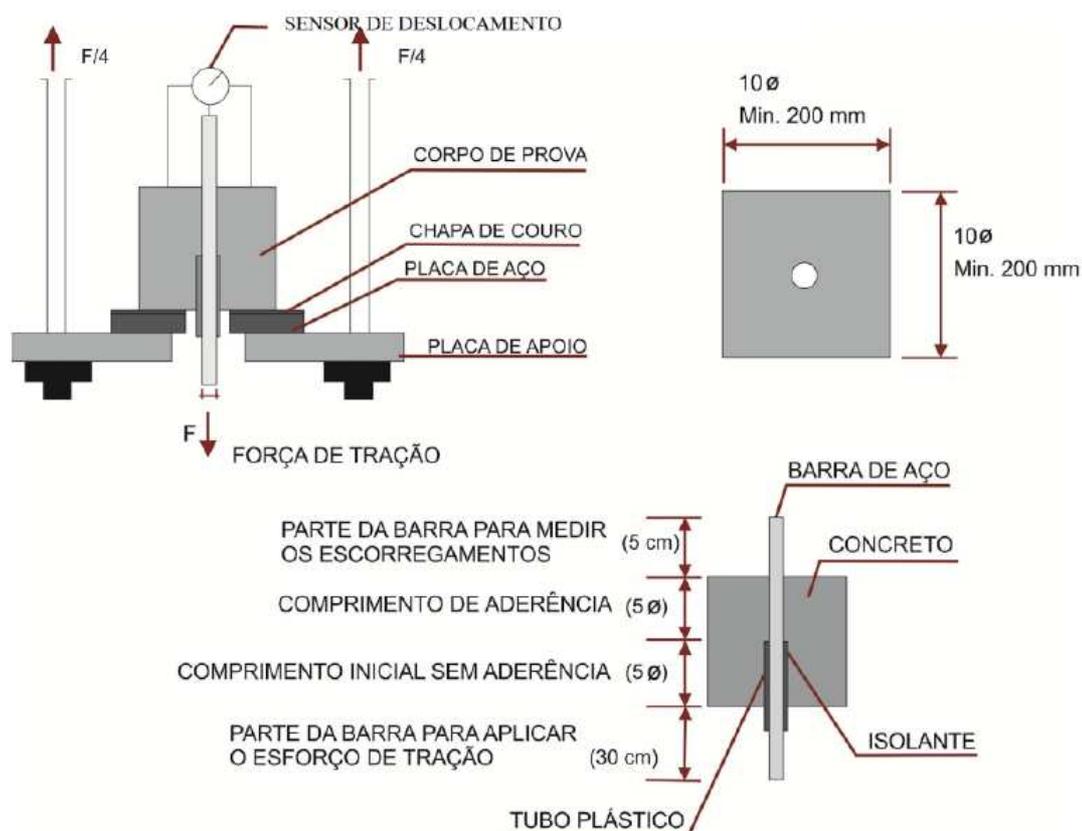
Nas seções fissuradas, a tensão na armadura atinge o seu valor máximo. À medida que se consideram seções mais afastadas das fissuras, essa tensão diminui e o concreto passa novamente a ser tracionado, como consequência da aderência existente entre os dois materiais. A transferência de tensões da armadura para o concreto ocorre em trechos cujo comprimento é tanto menor quanto maior for o coeficiente de aderência da barra em consideração. Esse coeficiente de aderência mede a eficiência da ligação entre os dois materiais. Para os problemas de ancoragem, esse coeficiente de aderência deve ser determinado a partir de ensaios de arrancamento (FUSCO, 2013).

#### 2.7.1. Ensaio de arrancamento direto ("Pull-out Test")

Existem diversos ensaios normatizados para determinação da tensão de aderência entre o concreto e o aço. Entre eles está o ensaio de arrancamento direto "Pull-out Test". Esse é o ensaio de aderência mais tradicional e que expressa a relação direta aço-concreto no processo de arrancamento, seu método consiste

fundamentalmente em extrair uma barra de aço, posicionada no centro de um corpo de prova cúbico de concreto, as extremidades da barra são projetadas para fora do corpo de prova. É medida a força de tração, aplicada em um dos extremos, e os deslocamentos no outro lado, conforme Figura 14 (FUSCO, 2013).

Figura 14 - *Pull-out test*.



Fonte: FERREIRA, 2012.

Esse ensaio é padronizado pela RILEM/CEB RC6 (1983), que detalha toda a execução. A tensão de aderência é obtida por meio da Equação (2.4).

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot \phi \cdot La} \quad (2.4)$$

Onde:  $\tau$  – Tensão de aderência (MPa);

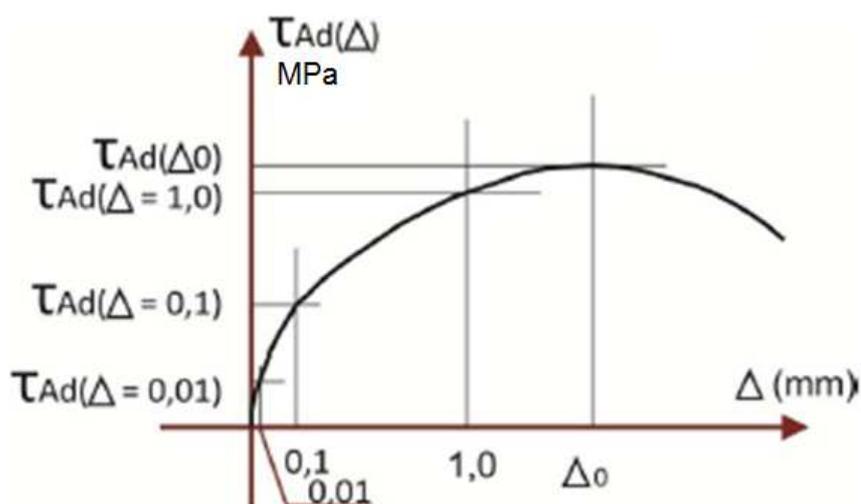
P – Carga P aplicada (N);

$\phi$  – diâmetro da barra (m);

$La$  – comprimento de ancoragem (m).

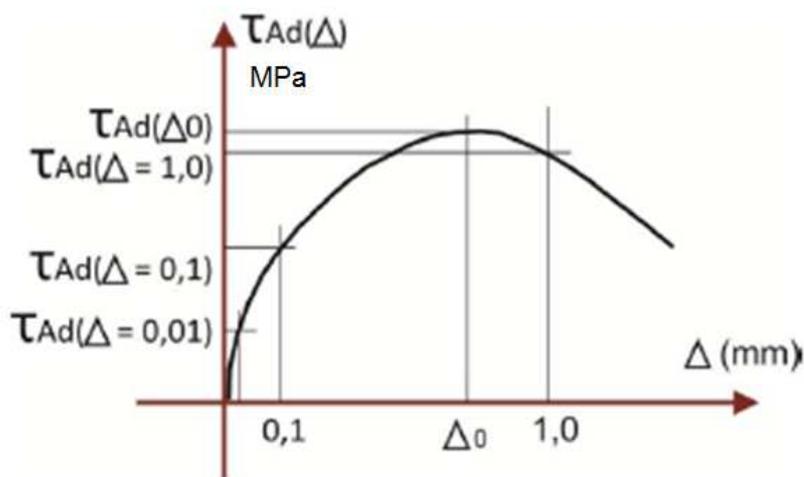
A resistência última de aderência é calculada com base na força máxima de arrancamento. Os deslizamentos medidos durante o ensaio são relacionados aos carregamentos correspondentes e, a partir desses valores, são obtidos gráficos de tensão de aderência versus deslizamento. Alguns valores de deslizamento são considerados importantes na resistência de aderência. O deslizamento de 0,1 mm é descrito como o referente à tensão de serviço e o deslizamento de 1,0 mm é relacionado à tensão de ruptura convencional. Entretanto, a ruptura pode ocorrer antes ou após esse deslizamento de 1,0 mm, conforme apresentado na Figura 15 e na Figura 16 (MONTROYA *et al.*, 1974; FRANÇA, 2010).

Figura 15 - Gráfico tensão *versus* deslizamento com o máximo ocorrendo após 1,0 mm.



Fonte: FRANÇA, 2010.

Figura 16 - Gráfico tensão *versus* deslizamento com o máximo ocorrendo antes de 1,0mm.



Fonte: FRANÇA, 2010.

Para o cálculo da resistência média de aderência ( $\tau_m$ ), Montoya *et al.* (1974) afirmam que devem ser consideradas as resistências de aderência que correspondem aos deslizamentos de 0,01; 0,1 e 1,0 mm ( $\tau_{0,01}$ ;  $\tau_{0,1}$ ; e  $\tau_{1,0}$ ), conforme a Equação (2.5).

$$\tau_m = \frac{(\tau_{0,01} + \tau_{0,10} + \tau_{1,00})}{3} \quad (2.5)$$

Quando a ruptura ocorre antes da peça alcançar o deslizamento de 1,0 mm, a resistência média é obtida por meio da Equação (2.6) (MONTROYA *et al.*, 1974).

$$\tau_m = \frac{(\tau_{0,01} + \tau_{0,10} + \tau_r)}{3} \quad (2.6)$$

Sendo  $\tau_r$  a tensão de ruptura.

No ensaio de arrancamento, há deslocamentos desde o princípio da aplicação da força. Depois de iniciado o escorregamento de toda a barra, a força de aderência ainda pode aumentar. Esse aumento é pequeno para barras lisas, sendo maior para

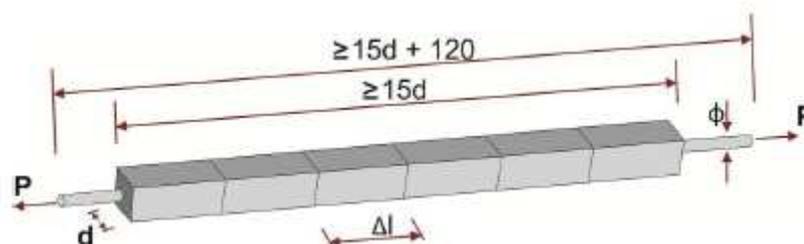
barras nervuradas, devido à maior capacidade de mobilização de aderência mecânica deste tipo de barra. A ruptura pode ocorrer por arrancamento, onde acontece o escorregamento da barra, uma vez que há um confinamento suficiente, ou por fendilhamento, onde o concreto não é o suficiente para garantir o confinamento da barra. Nesse último caso, devido aos esforços de tração ocorre o fendilhamento do concreto (FUSCO, 2013).

A vantagem do ensaio de arrancamento direto é o baixo custo e a simplicidade do corpo de prova, a facilidade de isolar uma única variável, eliminando a influência das demais e a possibilidade de uma visualização objetiva do próprio conceito de comprimento mínimo de ancoragem. O autor também comprova que ao aumentar a resistência à compressão do concreto, a tensão última de aderência também aumenta (RIBEIRO, 1985).

#### 2.7.2. Ensaio de barras confinadas

O ensaio de barras confinadas é utilizado para determinar o coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. Esse ensaio traduz os efeitos da fissuração no concreto e o comportamento de transferência de tensões entre o aço e o concreto. Segundo as prescrições da NBR 7477 (ABNT, 1982), esse ensaio consiste na aplicação de esforços de tração nos extremos de uma barra de aço confinada em um molde prismático de concreto conforme apresentado na Figura 17, com o objetivo de avaliar a aderência entre o concreto e o aço (FRANÇA, 2010).

Figura 17 - Modelo de corpo de prova para ensaio de barras confinadas.



Fonte: FRANÇA, 2010.

Ao final do ensaio, o corpo de prova deve apresentar fissuras conforme a Figura 18. O coeficiente de conformação superficial é calculado por meio da avaliação do

número de fissuras e seus espaçamentos médios por meio da Equação(2.7) (NBR 7477, 1982).

Figura 18 - Modelo de corpo de prova para ensaio de barras confinadas.



Fonte: NBR 7477, 1982, p. 5.

$$\eta = \frac{2,25 \cdot d}{\Delta l \text{ médio}} \quad (2.7)$$

Onde:  $\eta$  - Coeficiente de conformação superficial;

$d$  - lado da seção do tirante;

$\Delta l$  médio - Distância média entre fissuras considerando as quatro faces.

A partir do cálculo do espaçamento médio entre as fissuras, obtido no ensaio supracitado, propôs uma dedução teórica para o cálculo das tensões médias de aderência conforme a Equação (2.8) (CASTRO, 2000).

$$\tau_{ad} = 0,375 \cdot \frac{f_t \cdot \phi}{X_M \cdot \rho} \quad (2.8)$$

Onde:  $f_t$  - é a resistência à tração por compressão diametral do concreto;

$\phi$  - é o diâmetro da barra de aço utilizada no ensaio;

$X_M$  - é o espaçamento médio entre as fissuras;

$\rho$  - é a razão entre a área de aço ( $A_s$ ) e a área de concreto ( $A_c$ ).

A NBR 7480 (ABNT, 2007) estabelece no item 5.3.2 que as barras e os fios de diâmetro nominal 10 mm ou superior devem apresentar um coeficiente de conformação superficial mínimo de 1,5, para barras de aço da categoria CA-50.

## 2.8. Resistência à aderência segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014)

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece que a resistência de aderência de cálculo entre armadura e concreto na ancoragem de armaduras passivas deve ser obtida pela Equação (2.9).

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (2.9)$$

Onde:  $\eta_1 = 1,0$  para barras lisas;

$\eta_1 = 1,4$  para barras entalhadas;

$\eta_1 = 2,25$  para barras nervuradas;

$\eta_2 = 1,00$  para situação de boa aderência;

$\eta_2 = 0,70$  para situação de má aderência;

$\eta_3 = 1,00$  para  $\phi < 32$  mm;

$\eta_3 = (132 - \phi)/100$ , para  $\phi > 32$  mm;

$\phi$  - é o diâmetro da barra em milímetros.

Ao desenvolver a Equação (2.9) pode-se determinar o valor da resistência de aderência de cálculo da armadura passiva por meio da Equação (2.10).

$$f_{bd} = \frac{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot 0,7 \cdot (0,3 \cdot f_{ck})^{2/3}}{\gamma_c} \quad (2.10)$$

Ao analisar a Equação (2.10) pode-se concluir que a resistência de aderência depende além da resistência à compressão do concreto, da conformação superficial da barra de aço, posição da armadura durante a concretagem e diâmetro da barra.

## 2.9. Resistência de aderência segundo a B.A.E.L 91 (2000)

A norma francesa B.A.E.L. 91 (1994) estabelece a Equação (2.11) para cálculo da resistência de aderência ( $\tau_s$ ).

$$\tau_s = 0,6 \cdot \psi_s^2 \cdot f_{tj} \quad (2.11)$$

Onde:  $\psi_s$  - coeficiente relacionado à conformação superficial das barras e fios de aço;

$f_{tj}$  - resistência característica do concreto à tração aos "j" dias de idade, definida convencionalmente pela relação proposta na Equação (2.12).

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 \cdot f_{cj} \quad (2.12)$$

Onde:  $f_{cj}$  - a resistência característica do concreto à compressão, aos "j" dias de idade.

A B.A.E.L. 91 (2000) estabelece diferentes valores para  $\psi_s$ , de acordo com a conformação superficial das barras de aço. Para barras de alta aderência, ou nervuradas, o valor de  $\psi_s$  é 1,5. Para barras lisas, esse coeficiente é igual a 1,0.

## 2.10. Aderência entre aço e concretos produzidos com agregado reciclado

Oliveira e Assis (2006) demonstram que existem diversos fatores que podem influenciar a tensão de aderência entre a barra de aço e o concreto. Porém os autores investigaram apenas a influência da resistência à compressão simples e o tipo de aço empregado no reforço do concreto. Nesse estudo foram produzidos corpos de prova com substituição de 0, 20, 40 e 100% do agregado natural por agregado reciclado, a Tabela 1 apresenta os resultados obtidos na pesquisa.

Tabela 1 - Tensão média da resistência à compressão simples e da aderência.

Concreto	REC0	REC20	REC40	REC100
AGG (%)	0	20	40	100
$\sigma_c$ (MPa)	34,8 ± 1,4	38,2 ± 2,6	34 ± 2,8	24,2 ± 2,2
$\tau_{bm}$ (MPa)	8,2 ± 1,1	10,6 ± 2,5	8,1 ± 3,1	4,3 ± 1,6

Fonte: Oliveira e Assis, 2006, p. 140

A resistência à compressão do concreto de referência é praticamente igual ao concreto com 40% de substituição do agregado natural, mas ao considerar o desvio padrão, esse panorama fica alterado em detrimento ao concreto com 40% de substituição, que possui resistência inferior ao concreto com 20% de substituição do

agregado natural. Entretanto, a resistência à aderência diminui progressivamente, esse fato ocorre devido a substâncias expansivas que preenchem os vazios do concreto, tornam o mesmo mais compacto, porém esses materiais não possuem resistência à tração, quando a barra de aço é tracionada, ocorre o seu deslizamento, o que promove um desvio padrão maior nas tensões de aderência e compressão. Esse estudo demonstra a possibilidade do emprego dos agregados reciclados na produção de concretos para fins estruturais, desde que seu percentual não seja superior a 20% (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Xiao e Falkner (2007) asseguram que o comprimento de ancoragem dos vergalhões de aço no concreto com agregado graúdo reciclado, sob as mesmas condições de resistência à compressão que a resistência de ligação aço-concreto, é maior do que no concreto normal. De acordo com os fatores que influenciam o comprimento de ancoragem, tais como resistência à compressão do concreto e diâmetro da barra, o comprimento de ancoragem da barra de aço no concreto com 100% de agregado graúdo reciclado pode ser estimado ligeiramente mais curto do que aqueles para o concreto normal para o caso de resistência à compressão equivalente. O documento sugere que o comprimento de ancoragem de barras de aço embutidas no concreto com 100% de agregado graúdo reciclado pode ser determinado como o mesmo para o concreto normal sob a condição de mesma resistência à compressão.

Prince e Singh (2013) confirmam as observações feitas por Xiao e Falkner (2007), de que a aderência aço-concreto é semelhante em todas as porcentagens de substituição do agregado graúdo. Indicam que o comprimento de ancoragem de barras de aço em concretos com agregado reciclado pode ser menor do que nos concretos convencionais. No entanto, como medida conservadora, sugere que se adote comprimentos de ancoragem semelhantes.

Kim *et al.* (2015) conclui que até 60% de substituição do agregado fino, a aderência entre o aço e o concreto não parece ser muito afetada. A pequena diminuição da aderência é acompanhada pela queda na resistência à compressão, que é o parâmetro mais apropriado para mensurar a força de ligação entre o aço e o concreto.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. MATERIAIS**

O material aglomerante utilizado foi o cimento CII-E 32 por ser um material de fácil disponibilidade no mercado, o agregado miúdo utilizado foi a areia de origem quartzosa grossa que foi previamente seca em estufa a 110°C por 24 h ou até à constância de massa, o agregado graúdo natural utilizado foi a brita de origem gnaíse com diâmetro máximo de 19 mm, material que foi peneirado para remoção de todo material pulverulento ou qualquer impureza e seco ao ar. Resíduos de construção civil reciclados na forma de agregados, obtidos em usina de beneficiamento da Prefeitura de Belo Horizonte, unidade BR-040, denominados como brita 1, enquadrados na faixa granulométrica das peneiras de malha com abertura de 19 mm a 4,75 mm, o material foi lavado e peneirado para remoção de todo material pulverulento ou qualquer impureza e seco em estufa a 110°C por 24 h ou até à constância de massa. Barra de aço nervurada CA-50 com diâmetro de 10 mm.

#### **3.2. MÉTODOS**

Para avaliar a tensão de aderência em concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, foi produzido um traço de referência que atende às diversas recomendações da ABNT para concreto estrutural e concretos com a substituição do agregado graúdo natural por reciclado de RCD.

Para determinação da porcentagem de substituição do agregado reciclado, foi adotado como referência os estudos feitos por Xiao e Falkner (2007), que adotou os percentuais de 0%, 50% e 100% de substituição do agregado graúdo natural por reciclado; Prince e Singh (2013) que adotou os percentuais de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição do agregado graúdo natural por reciclado e Kim *et al.* (2015) que adotou os percentuais de substituição de 0%, 30%, 60% e 100%.

Adotou-se nesta pesquisa os percentuais de 0%, 25%, 50% e 100% de substituição do agregado graúdo natural por reciclado.

Em seguida foram realizados ensaios de caracterização do agregado graúdo reciclado para comparação com o agregado natural. Foram seguidos os

procedimentos descritos na NBR 15116 (ABNT, 2004) para classificação do agregado reciclado em Agregado Reciclado de Concreto (ARC) ou Agregado Reciclado Misto (ARM). Após a classificação do agregado reciclado foi verificado se as propriedades do agregado reciclado atendem aos limites estabelecidos pela norma (não foi verificado o percentual dos contaminantes: sulfatos, cloretos e torrões de argila).

A Tabela 2 apresenta os ensaios realizados para caracterização do agregado reciclado e as respectivas normas utilizadas.

Tabela 2 - Ensaios para caracterização do agregado graúdo reciclado.

Norma	Descrição do ensaio
NBR 7227/1987	Determinação da composição granulométrica
NBR-NM 53/2003	Massa específica, aparente e absorção de água
NBR NM 46/2003	Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem
NBR 15116/2004	Determinação da composição dos agregados por análise visual
NBR NM 46/2006	Determinação da massa unitária do agregado graúdo
NBR NM 51/2001	Determinação da abrasão "Los Angeles"
NBR 9776/1987	Determinação da massa específica do agregado miúdo

Fonte: Autor, 2017.

Após a caracterização do agregado reciclado, se fez o estudo do traço do concreto para atender a resistência mínima de 25 MPa, que abrange a maior parte dos concretos para fins estruturais. Para produção do concreto foi utilizado o método de dosagem proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Foram realizadas duas moldagens sendo denominadas estudo preliminar e estudo principal. O estudo preliminar utilizou a substituição do agregado natural em massa, sem o uso de aditivo plastificante e o estudo principal para moldagem do traço, foi adotada a substituição do agregado graúdo natural por reciclado em relação ao volume de agregado com o uso de aditivo plastificante (CEMIX 2000 da Vedacit) na mistura.

Na primeira dosagem de concreto foram produzidos cinco corpos de prova para cada amostra sendo denominadas como T1-R, T1-25, T1-50 e T1-100, com substituição de 0%, 25%, 50% e 100% do agregado graúdo natural respectivamente.

Na segunda moldagem dos corpos de prova o plastificante foi pesado, adicionado e diluído em uma porção de 70% do volume total de água do traço na betoneira em conjunto com o agregado graúdo natural, a betoneira agitou por 30", em seguida foi adicionado o cimento a areia e o restante da água. Nas amostras com 25, 50 e 100% de substituição, o agregado reciclado foi adicionado na betoneira por último para evitar a absorção da água do agregado reciclado. Por meio do método ABCP, foi calculado um novo traço, com fator a/c maior, para garantir uma melhor trabalhabilidade do concreto. Foram produzidos cinco corpos de prova para cada amostra sendo denominadas como T2-R, T2-25, T2-50 e T-100, com substituição de 0%, 25%, 50% e 100% do agregado graúdo natural respectivamente.

A Tabela 3 apresenta a descrição das amostras com o respectivo consumo de materiais.

Tabela 3 - Dosagem de concreto para produção do traço.

Traço	Amostra	Nº CP's submetidos a ensaio de compressão	Consumo de cimento (kg/m³)	Consumo de areia (kg/m³)	Consumo de Brita (kg/m³)	Consumo de agregado reciclado (kg/m³)	Consumo de água (kg)	Plastificante (g)
1 : 1,08 : 1,96 : 0,44	T1-R	5	514	555	1007	0	226	0
	T1-25				755	252		
	T1-50				503	503		
	T1-100				0	1007		
1 : 1,64 : 2,08 : 0,45	T2-R		455	746	946	0	205	2730
	T2-25				709	202		
	T2-50				473	404		
	T2-100				0	808		

Fonte: AUTOR, 2017.

Após análise da moldagem dos dois traços foi definido o traço do concreto mais adequado, com melhor trabalhabilidade e menor dispersão de resultados. Em seguida iniciou a produção de corpos de prova para análise da tensão de aderência.

A aderência aço concreto foi avaliada a partir dos resultados de dois ensaios: arrancamento direto "*Pull Out Test*" (POT), citado por Fusco (2013) e Porto (2015) como ensaio mais tradicional para avaliação da tensão de aderência e utilizados por Xiao e Falkner (2007), Prince e Singh (2013), França (2010), Tavares *et al.* (2014), Kim *et al.* (2015) para avaliação da tensão de aderência. Também foram feitos

ensaio de barras confinadas, por ser o ensaio recomendado pela norma brasileira NBR 7477 (ABNT, 1982).

Para caracterização do concreto, foram realizados ensaios de compressão uniaxial, compressão diametral e módulo de elasticidade. Propriedades mecânicas, levantadas por Ribeiro (1985), Dumêt (2003), Barbosa *et al.* (2008), Reyes (2009), Tavares *et al.* (2014) e Angst *et al.* (2017) que influenciam a tensão de aderência.

Nos itens abaixo serão descritos os procedimentos realizados nos ensaios de caracterização do agregado reciclado e caracterização mecânica dos concretos produzidos. Além dos procedimentos realizados nos ensaios de arrancamento direto e barras confinadas.

### **3.3. Caracterização do material agregado reciclado**

#### **3.3.1. Composição Granulométrica**

Conforme descrito na NBR NM 248 (ABNT, 2003), o material foi previamente seco em estufa a 110°C por um período de 24h. Em seguida foram separadas duas amostras da brita reciclada com 5 kg cada, GREC1 e GREC2, e duas amostras da brita de referência com 5 kg cada, GREF1 e GREF2.

As peneiras foram previamente limpas e taradas, encaixadas de modo a formar um único conjunto de peneiras, com abertura e malha em ordem crescente da base para o topo. Foram utilizadas as peneiras de 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm 6,3 mm e 4,75 mm.

As amostras foram despejadas sobre a peneira de 25 mm. Em seguida, o conjunto passou por agitação mecânica durante 5 min. Logo após o material foi pesado para elaboração da curva granulométrica.

#### **3.3.2. Massa específica, aparente e absorção de água**

Conforme determinado na NBR NM 53 (ABNT, 2003), o material foi previamente peneirado na peneira de malha 4,75 mm e lavado para se evitar a presença de pó e materiais de superfície, em seguida as amostras foram secas em estufa a 110°C

durante 24 h. Foram separadas duas amostras de 3 kg, do agregado reciclado, MREC1 e MREC2, e do agregado natural, MREF1 e MREF2.

As amostras ficaram submersas em água por um período de 24 h, em seguida, as amostras foram retiradas da água e envolvidas em um pano até toda a água visível ser eliminada, imediatamente após ser enxugada a amostra foi pesada e se determinou a massa ao ar da amostra saturada ( $m_s$ ).

Após determinação de  $m_s$  a amostra foi fracionada em três parcelas, uma vez que, o recipiente para medir o peso do agregado submerso, não comporta todo volume e peso já que a balança utilizada tem capacidade máxima de 4100 g. O material foi pesado submerso em água, para determinação da massa submersa ( $m_a$ ).

Logo em seguida, as amostras foram secas em estufa a 110°C por um período de 24 h, posteriormente pesadas para determinação da massa seca ( $m$ ).

Após determinação dos parâmetros, passou-se ao cálculo da massa específica, massa específica aparente e da absorção de água.

### 3.3.3. Determinação do material fino que passa através da peneira 75 $\mu\text{m}$ , por lavagem

A amostra foi seca em estufa a 110°C por um período de 24 h, conforme determina a NBR NM 46 (ABNT, 2003). Após secar o material até constância de massa, separou-se uma amostra de 2.500,90 g. Em seguida o material foi colocado em um recipiente, onde se adicionou água, até a sua cobertura. A amostra foi agitada manualmente, para obter a separação das partículas mais finas que 75  $\mu\text{m}$ . Imediatamente, a água de lavagem contendo os sólidos suspensos e dissolvidos foram despejados sobre as peneiras de malha 1,18 mm e 75  $\mu\text{m}$ .

A operação foi refeita até a água de lavagem ficar clara. O material retido nas peneiras foi retornado à amostra e a mesma foi seca em estufa a 110°C por um período de 24 h, em seguida determinou-se a massa da amostra.

#### 3.3.4. Determinação da composição dos agregados por análise visual

Conforme procedimento estabelecido no Anexo A da NBR 15116 (ABNT, 2004), foram separadas duas amostras com aproximadamente 4 kg, essas foram lavadas em água corrente, sobre uma peneira de malha 4,8 mm, em seguida as amostras foram secas em estufa a 110°C por um período de 24 h. Os fragmentos das amostras foram separados manualmente, seguindo os critérios:

- grupo 1: fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume;
- grupo 2: fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume;
- grupo 3: fragmentos de cerâmica branca ou vermelha, com superfície não polida, em mais de 50% do volume;
- grupo 4: fragmentos de materiais não minerais de natureza orgânica como madeira, plástico, betume e materiais carbonizados, e de contaminantes como vidros, vidrados cerâmicos e gesso.

Em seguida, determinou as massas de cada grupo e a porcentagem de cada um em relação a massa total, para cada amostra.

#### 3.3.5. Determinação da massa unitária do agregado graúdo

Foram separadas duas amostras, sendo Massa Unitária de Referência (MUREF) agregado natural e Massa Unitária Reciclado (MUREC) agregado reciclado. Conforme determinado na NBR NM 46 (ABNT, 2003), as amostras foram previamente secas em estufa por um período de 24 h a 110 °C, em seguida a massa do recipiente vazio, com volume conhecido de 19 L, foi determinada e registrada, em sequência o recipiente foi cheio até o transbordo do material, respeitando a altura de lançamento de 50 mm acima da borda superior do recipiente em seguida a camada superficial foi nivelada.

Em seguida registrou a massa do recipiente mais o material para o cálculo da massa unitária. Passou-se ao cálculo da massa unitária dos agregados na condição

saturada com superfície seca e do índice de volume de vazios nos agregados em porcentagem.

#### 3.3.6. Determinação da abrasão "Los Angeles"

Foram separadas duas amostras de agregado reciclado e duas amostras do agregado natural, essas foram secas em estufa a 110°C por um período de 24 h, conforme estabelecido na NBR NM 51 (ABNT, 2001), foram separados 5 kg de cada amostra. A carga abrasiva foi de 11 esferas de aço, com massa aproximada de 4584 g, verificada a limpeza interna do tambor adicionou-se a carga abrasiva e a amostra, acionou o tambor com rotação de 33 rpm (rotações por minuto) até completar 500 rotações. Posteriormente o material foi lavado na peneira com abertura de malha de 1,7 mm e levado a estufa para secar a 110°C por 24h.

#### 3.3.7. Determinação da massa específica do agregado miúdo

A massa específica do agregado miúdo foi determinada através o frasco de chapman, conforme descrito na NBR 9776 (ABNT, 1987). A amostra foi seca em estufa a 110°C por 24 h, em seguida foi adicionado água ao frasco até a marca de 200 cm<sup>3</sup>, em seguida o recipiente permaneceu em repouso para que a água aderida as paredes do frasco escorressem totalmente. Adicionou-se 500 g do agregado miúdo previamente seco em estufa ao recipiente, que foi agitado para eliminação das bolhas de ar.

Em seguida aferiu o volume indicado no frasco para determinação da massa específica.

### 3.4. Ensaio de arrancamento

Os ensaios de arrancamento direto foram realizados de acordo com as recomendações da RILEM CEB FIP RC6 (1992).

### 3.4.1. Determinação do tamanho da amostra

O número de repetições (N) foi definido com base nos resultados do trabalho de Ferreira (2012), a partir do erro estatístico (e) associado ao desvio padrão (s) dos resultados encontrados pela autora.

No trabalho citado foi utilizado concreto com resistência à compressão de 40 MPa e barras nervuradas. As amostras foram compostas por 6 CP's e foram obtidos, para barras de 10,0 mm, média da tensão última de aderência de 1,20 MPa e desvio padrão de 0,30 MPa. A partir desses resultados calculou-se o erro "e", adotando-se a Equação (3.1).

$$e = t_v \cdot \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (3.1)$$

Onde: e - erro estatístico;

$t_v$  - o valor encontrado na tabela de "distribuição de *Student*", para um nível de confiança de 95%;

s - desvio padrão;

N - número de repetições.

Assim, obteve-se um erro de 0,32 MPa correspondente a 26,7% da média amostral para os ensaios de Ferreira (2012), realizados com barras entalhadas. Na tentativa de reduzir esse erro, de 26,7%, acrescentou-se 4 corpos de prova ao número de repetições proposto pela autora, caso fosse necessário descartar alguma amostra que apresentasse problema durante a execução do ensaio, ou caso o desvio padrão aumentasse. Assim, o novo tamanho da amostra foi de 10 corpos de prova para cada amostra. Foram realizados 40 ensaios, todos aos 28 dias de idade do concreto.

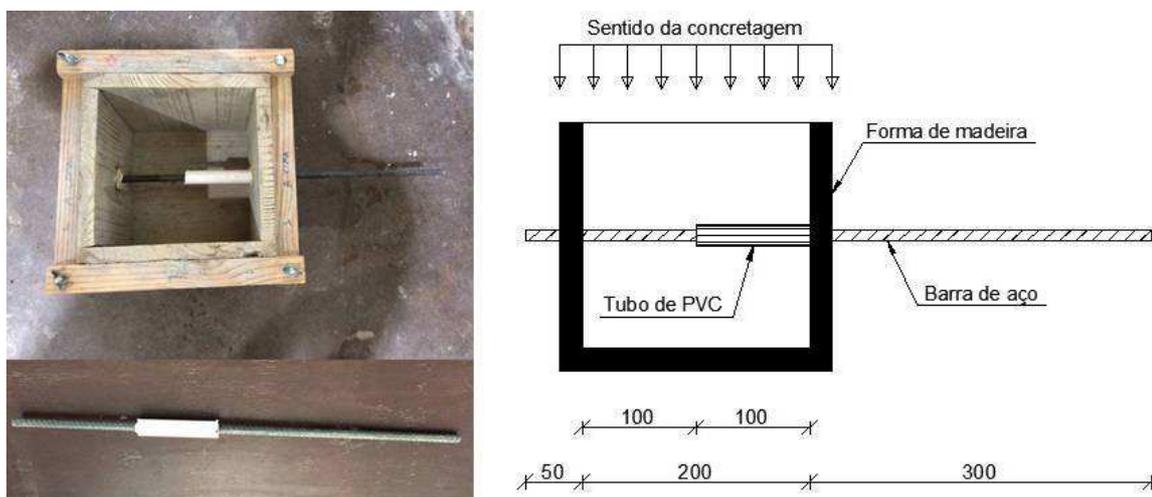
### 3.4.2. Modelos para o ensaio *POT*

As formas foram fabricadas em formato cúbico, com dimensões de 200 mm, em madeira, de acordo com as recomendações da RILEM-CEB RC6 (1983). Não foi utilizado desmoldante.

Conforme apresentado na Figura 19, o comprimento de ancoragem adotado foi igual a 100 mm, correspondente a 10 vezes o diâmetro de 10 mm da barra de aço CA-50 utilizada (FERREIRA, 2012). Conforme observado por Ferreira (2012), o comprimento de ancoragem de cinco diâmetros é muito pequeno e contribui para elevar o coeficiente de variação dos resultados. O comprimento não aderente foi isolado utilizando-se um tubo de PVC rígido com diâmetro de 20 mm. Para fixação destes nas barras de aço utilizou-se fita crepe.

A Figura 19 apresenta as formas montadas, com barra de aço posicionada, pronta para receber o concreto.

Figura 19 – Leiaute do corpo de prova para ensaio de arrancamento direto, dimensões em mm.



Fonte: AUTOR, 2017.

O adensamento dos corpos de prova foi realizado com vibrador de imersão do tipo agulha com 25 mm de diâmetro. Após 24 horas os corpos de prova foram retirados das fôrmas e dispostos em tanques com água e solução de hidróxido de cálcio para cura, durante 28 dias.

### 3.4.3. Sistema de aplicação de carga ensaio *POT*

Os ensaios foram realizados na máquina universal DL30000, marca EMIC, cuja capacidade de carga é 300 kN. Foi desenvolvido um suporte especial para execução dos ensaios de arrancamento, para um posicionamento adequado do corpo de prova. Para a execução do ensaio foi aplicada uma força de tração na extremidade inferior das barras de aço e foram medidos os deslocamentos relativos na outra

extremidade, utilizando-se um "transdutor de deslocamento", a Figura 20 ilustra os equipamentos utilizados.

Figura 20 - Equipamentos utilizados no ensaio POT.



Fonte: AUTOR, 2017.

As leituras das cargas e dos deslocamentos correspondentes foram realizadas utilizando o sistema de aquisição de dados da máquina universal. A resistência de aderência foi determinada por meio da Equação (2.4). Para o cálculo da resistência média de aderência ( $\tau_m$ ), utilizou-se o proposto por MONTROYA *et al.* (1974), conforme Equações (2.5) e (2.6), sendo consideradas as resistências de aderência que correspondem aos deslizamentos de 0,01; 0,1 e 1 mm ( $\tau_{0,01}$ ;  $\tau_{0,1}$ ; e  $\tau_{1,0}$ ). Quando a ruptura ocorreu antes da peça alcançar o deslizamento de 1,0 mm, a resistência média foi obtida por meio da Equação (2.6). Foram obtidas, ainda, curvas de tensão de aderência *versus* deslocamento.

### 3.5. Ensaio de barras confinadas

Para a realização dos ensaios de barras confinadas seguiu-se as prescrições da NBR 7477 (ABNT, 1982).

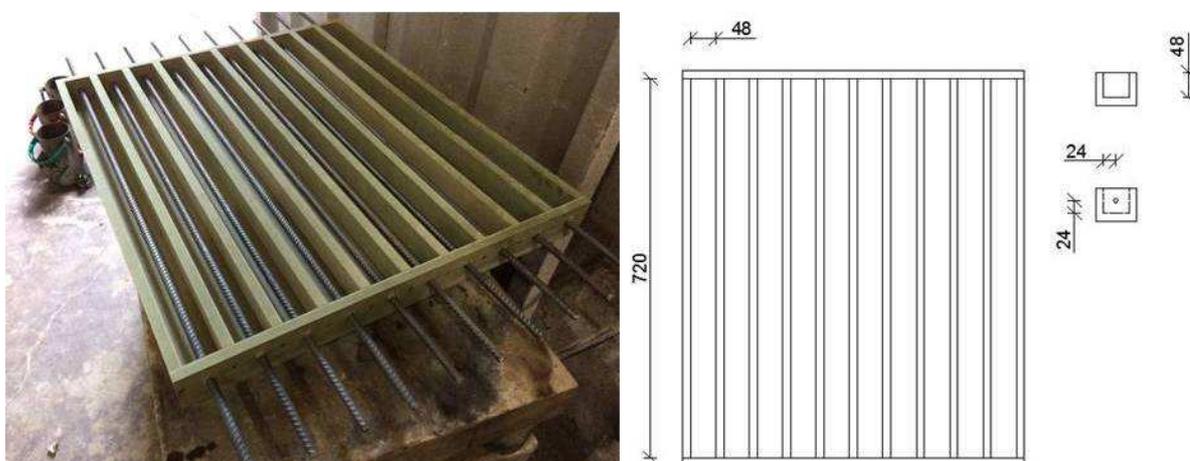
### 3.5.1. Determinação do tamanho da amostra

A NBR 7477 (ABNT, 1982) determina que devem ser efetuados, no mínimo, nove ensaios para cada tipo de perfil e bitola, acrescentou-se 1 corpos de prova ao número de repetições proposto pela NBR, caso fosse necessário descartar alguma amostra que apresentasse problema durante a execução do ensaio, foram executados, portanto, dez corpos de prova para cada amostra. Foram realizados um total 40 ensaios, todos aos 28 dias de idade do concreto.

### 3.5.2. Modelos para ensaio de barras confinadas

As formas foram fabricadas em formato de prismas, confeccionadas em madeira com as dimensões apresentadas na Figura 21, o adensamento foi feito em mesa vibratória. Após 72 horas os corpos de prova foram retirados das fôrmas e colocados em tanques submersos em água para cura, até a data de realização do ensaio.

Figura 21 - Forma para ensaio de barras confinadas.



Fonte: AUTOR, 2017.

### 3.5.3. Sistema de aplicação da carga

Após 28 dias de cura, os corpos de prova foram retirados do tanque e pintados com tinta óleo na cor branca, para facilitar a visualização das fissuras formadas durante o ensaio. Então foram ensaiados na máquina universal DL30000, da marca EMIC, com capacidade para 300 kN. De acordo com a NBR 7477 (ABNT, 1982), o

carregamento foi aplicado até atingir 80% da carga correspondente à tensão de escoamento da barra de aço. A Figura 22 apresenta um corpo de prova na posição para o ensaio.

Figura 22 - Máquina e corpo de prova no ensaio de barras confinadas.



Fonte: AUTOR, 2017.

Ao final do ensaio foram medidos os espaçamentos entre as fissuras que surgiram nas barras, sendo considerados apenas os corpos de prova que apresentaram no mínimo cinco fissuras em toda a seção transversal, conforme prescrito na NBR 7477 (ABNT, 1982).

### **3.6. Caracterização do concreto**

A resistência à compressão do concreto foi avaliada por meio de ensaios de compressão uniaxial, executados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007). O módulo de elasticidade estático foi determinado segundo a NBR 8522 (ABNT, 2008). Para a avaliação das propriedades citadas, foram adotados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de (10,0 x 20,0) cm, sendo considerados cinco corpos de prova, por amostra, para ensaio de compressão uniaxial e três corpos de prova, por

amostra, para o ensaio de módulo de elasticidade. A moldagem e cura dos corpos de prova foram realizadas segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015), as amostras foram armazenadas em tanques com água e solução de hidróxido de cálcio até a data de realização dos ensaios. Todos os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias de idade do concreto, no mesmo dia em que foram realizados os ensaios de barras confinadas e arrancamento direto. Para a aplicação da carga foi utilizado um módulo de compressão com capacidade de 2000 kN, acoplado à máquina universal DL30000. As leituras de carga foram feitas pela célula de carga do equipamento e os deslocamentos foram medidos utilizando-se “clip gages”. A coleta dos dados foi feita pelo sistema de aquisição de dados da máquina universal, conectado a um computador.

O ensaio de resistência à tração diametral foi executado de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011). Para esses ensaios também foram adotados cinco corpos de prova cilíndricos para cada amostra, com dimensões de (10,0 x 20,0) cm.

### 3.7. Programa experimental

A Tabela 4 apresenta o programa experimental realizado na pesquisa. As amostras foram subdivididas em REF, AR25, AR50 e AR100 sendo respectivamente concreto de referência, concreto com 25%, 50% e 100% de substituição do agregado graúdo natural por reciclado.

Tabela 4 - Número de corpos de prova por ensaio.

Amostra	POT	Barras Confinadas	Compressão uniaxial	Compressão diametral	Módulo de Elasticidade
REF	10	10	5	5	3
AR25	10	10	5	5	3
AR50	10	10	5	5	3
AR100	10	10	5	5	3

Fonte: Autor, 2017.

## **4. RESULTADOS E ANÁLISES**

Nos itens seguintes serão apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do agregado reciclado, ensaios de caracterização do concreto e ensaios de aderência realizados, também será apresentado uma análise sobre os resultados.

### **4.1. Caracterização do agregado reciclado**

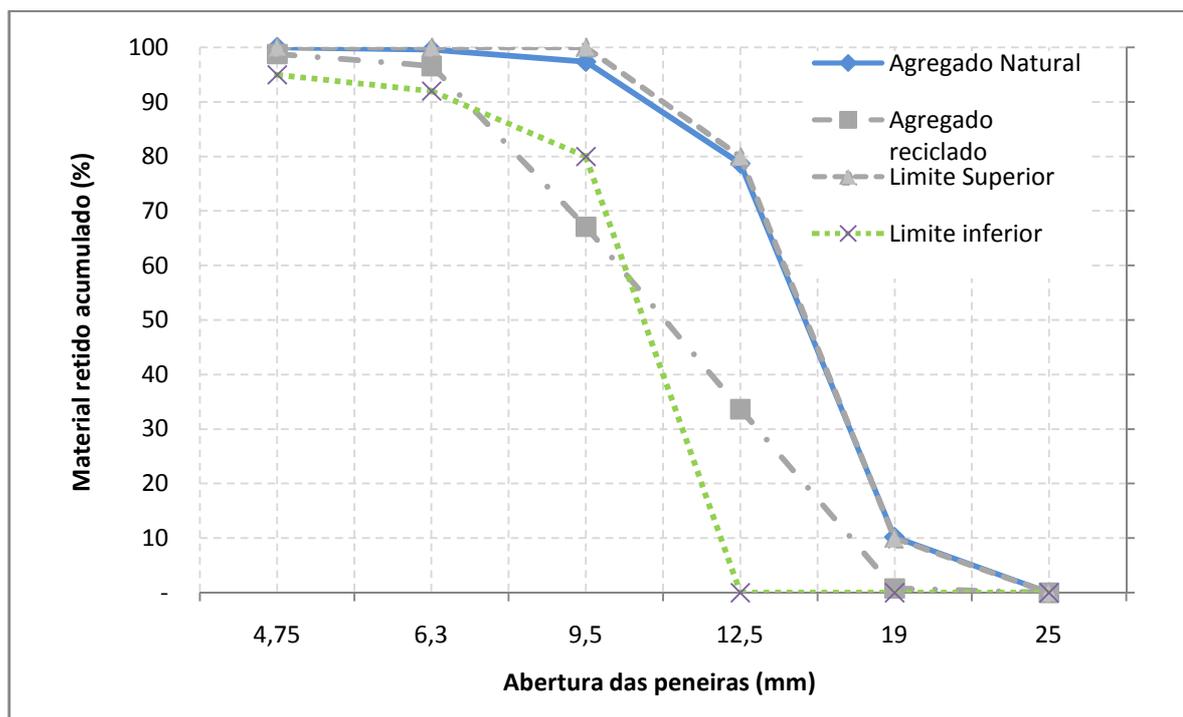
#### **4.1.1. Composição Granulométrica**

A peneira de malha de 25 mm, não reteve nenhum material, sendo então o diâmetro máximo dos agregados 19 mm. As quatro amostras apresentaram mesma dimensão máxima característica de 19 mm, o material retido nas peneiras individualmente também não diferiram mais que 4% entre si.

Pode-se observar que mesmo a amostra sendo lavada, ocorreu a presença de material fino no fundo. O material foi submetido novamente à agitação mecânica para verificar se estava ocorrendo abrasão desses, após 5 minutos o material de fundo foi acrescido em massa de 2 g, resultado que não foi considerado representativo para se configurar como abrasão.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) estabelece limites granulométricos dos agregados graúdos, conforme pode ser observado no Figura 23, o agregado graúdo reciclado ficou parcialmente fora dos limites estabelecidos pela norma para brita 1. A brita de referência se enquadra dentro da faixa estabelecida pela referida norma. Ao comparar a curva granulométrica da brita gnaisse e a brita reciclada, pode-se observar que a brita reciclada possui gradação mais distribuída, o que pode favorecer o empacotamento das partículas, também tem maior quantidade de materiais retidos entre as peneiras 9,5 mm e 6,3 mm. Já o agregado natural tem gradação mais uniforme com 70% das partículas entre 12,5 mm e 19 mm.

Figura 23 - Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado e natural.



Fonte: AUTOR, 2017.

#### 4.1.2. Propriedades do agregado reciclado

A Tabela 5 apresenta os parâmetros obtidos no ensaio de caracterização do agregado reciclado. Conforme já observado Leite (2001) e Brito *et al.* (2016) o agregado reciclado possui massa específica menor do que o agregado natural. A absorção de água do agregado reciclado é significativamente maior do que a do agregado natural. O valor de absorção de água do agregado reciclado está dentro dos limites estabelecidos no anexo A da NBR 15116 (ABNT, 2004) que estipula requisitos mínimos dos agregados reciclados para produção de concretos sem função estrutural. O agregado reciclado apresentou 2,12% de material fino, o que está dentro dos limites estabelecidos pela NBR 15116 (ABNT, 2004) para utilização de agregados reciclados na produção de concretos sem função estrutural. Pode-se observar que o agregado reciclado apresenta menor índice de vazios que o agregado natural. O agregado reciclado é mais abrasivo que o natural, pode-se concluir que apresenta menor resistência mecânica e por esse fato diminui a resistência à compressão do concreto.

Tabela 5 - Caracterização do agregado reciclado.

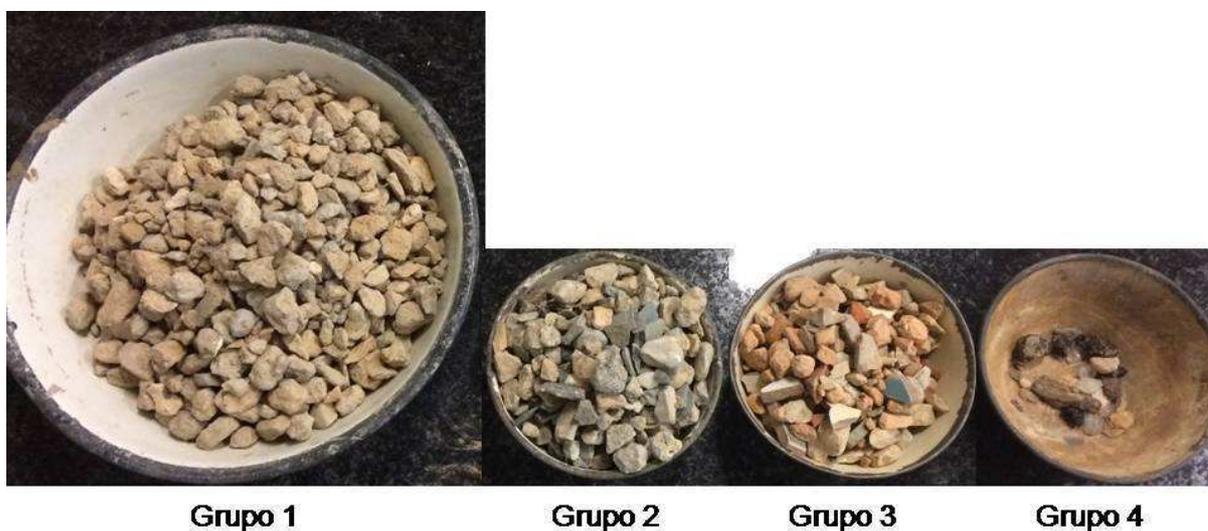
Parâmetros	Agregado Natural (Brita gnaisse)	Agregado Reciclado (Brita reciclada)
D (kg/m <sup>3</sup> )	2,64	2,07
d <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2,68	2,57
A (%)	0,50	9,28
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1.451,58	1.141,05
Massa Unitária Saturada Superfície Seca (kg/m <sup>3</sup> )	1.458,81	1.246,90
Índice de Vazios (%)	44,88	35,16
Abrasão "Los Angeles"	20,03%	44,73%
Material fino passante na peneira 75 µm, por lavagem	-	2,12%

Fonte: AUTOR, 2017.

#### 4.1.3. Determinação da composição dos agregados por análise visual

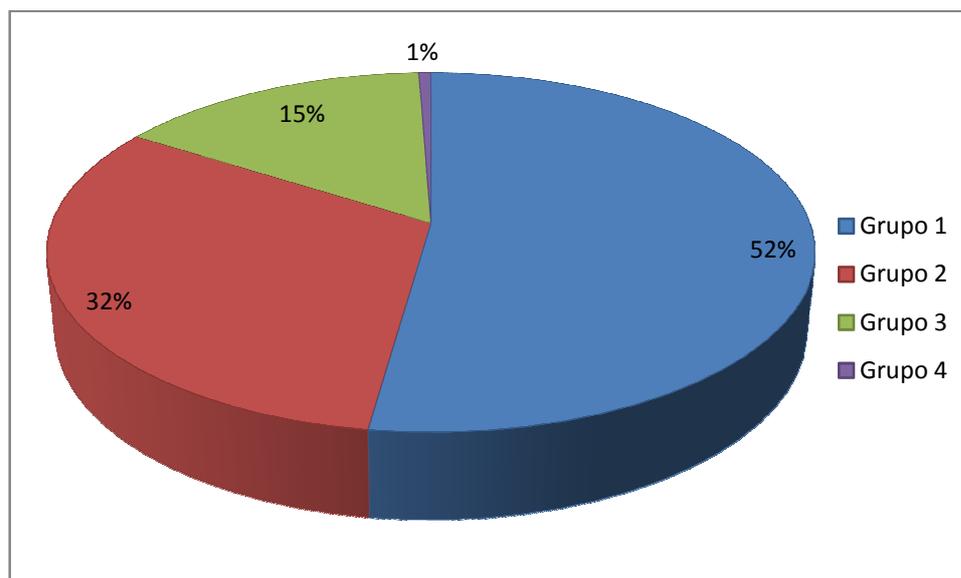
A Figura 24 apresenta a amostra de agregado reciclado fragmentada em subgrupos conforme determinado na NBR 15116 (ABNT, 2004) e a Figura 25 o percentual de cada subgrupo em relação a massa total da amostra.

Figura 24 - Separação manual dos fragmentos da amostra.



Fonte: AUTOR, 2017.

Figura 25 - Composição do agregado reciclado por análise visual.



Fonte: AUTOR, 2017.

Após análise dos resultados pode-se concluir que o material obtido na usina da BR-040 se enquadra no agregado tipo ARM, segunda a NBR 15116 (ABNT, 2004), onde o somatório dos percentuais dos grupos 1 e 2 são menores que 90% que o considera como um agregado reciclado misto.

O agregado em estudo não atende a LNEC (2006) que estipula que o agregado reciclado para produção de concreto para fins estruturais deve ter no mínimo 90% de resíduos de concreto. Também vai contra Ângulo (2013) que espera teores de até 5% de cerâmica vermelha nos agregados de RCD. Resultado que corrobora com o estudo de Melo (2011) que destaca a baixa qualidade dos agregados reciclados no Brasil. A amostra apresenta baixo índice de materiais não minerais, apenas 0,57%, a NBR 15116 (ABNT, 2004) prevê um teor de até 2%. Porém deve ser avaliado ainda os teores de cloretos, sulfatos e torrões de argila, conforme alertado por Lima (1999).

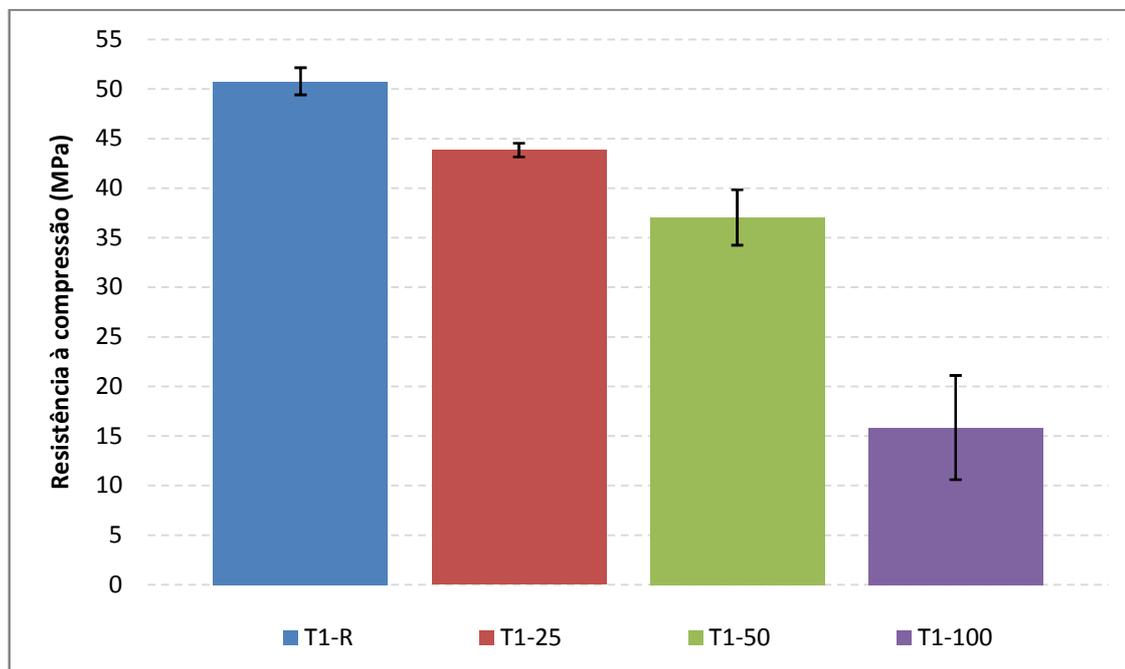
#### 4.2. Estudo do traço

Na moldagem dos corpos de prova do traço proposto na Tabela 3, com substituição do agregado natural por agregado reciclado em massa foram obtidos os abatimentos de 0,5 cm na amostra T1-R, 1,0 cm na amostra T1-25 e zero nas amostras T1-50 e T1-100. Observou-se que ocorreu uma redução da trabalhabilidade do concreto com

a substituição do agregado natural por reciclado, fator já destacado por Leite (2001) e Tenório *et al.* (2012). A redução da trabalhabilidade pode ser justificada pelo alto índice de absorção de água do agregado reciclado, 9,28% conforme indicado na Tabela 5. Ao considerar que a amostra T1-50 consome 503 kg/m<sup>3</sup> de agregado gráudo reciclado pode-se dizer que aproximadamente 46 L de água serão absorvidos pelo agregado reciclado e que restará apenas 180 L de água disponível na mistura o que abaixa o fator a/c do traço de 0,44 para 0,35 o que inviabiliza a mistura sem o uso de aditivo plastificante. O mesmo acontece na amostra T1-100 que consome 1007 kg/m<sup>3</sup> de agregado gráudo reciclado e aproximadamente 93 L de água disponível na mistura e abaixa o fator água cimento de 0,44 para 0,25. Os resultados de abatimento das amostras não são satisfatórios já que impossibilita um adensamento adequado do concreto.

A Figura 26 apresenta os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova T1-R, T1-25, T1-50 e T1-100.

Figura 26 - Resistência à compressão dos CP's referente ao Traço 1.



Fonte: AUTOR, 2017.

Ao analisar os resultados da Figura 26 pode-se verificar uma redução da resistência à compressão com o aumento do percentual de substituição do agregado gráudo reciclado por natural, resultado também observado por Leite (2001), Vieira *et al.*

(2004) e Angst (2017). Pode-se verificar que ocorreu uma redução de aproximadamente 10% da amostra T1-R para a amostra T1-25, já as amostras T1-50 e T1-100 tiveram uma dispersão de resultados significativa, quando comparada aos anteriores, devido à dificuldade no adensamento dos corpos de prova.

Com a adequação do traço e a incorporação de aditivo superplastificante obteve-se melhor trabalhabilidade do concreto. As amostras T2-R e T2-25 apresentaram abatimento de 6,5 cm, a amostra T2-50 apresentou abatimento de 5,5 cm já a amostra T2-100 não apresentou abatimento, conforme pode ser observado na Figura 27.

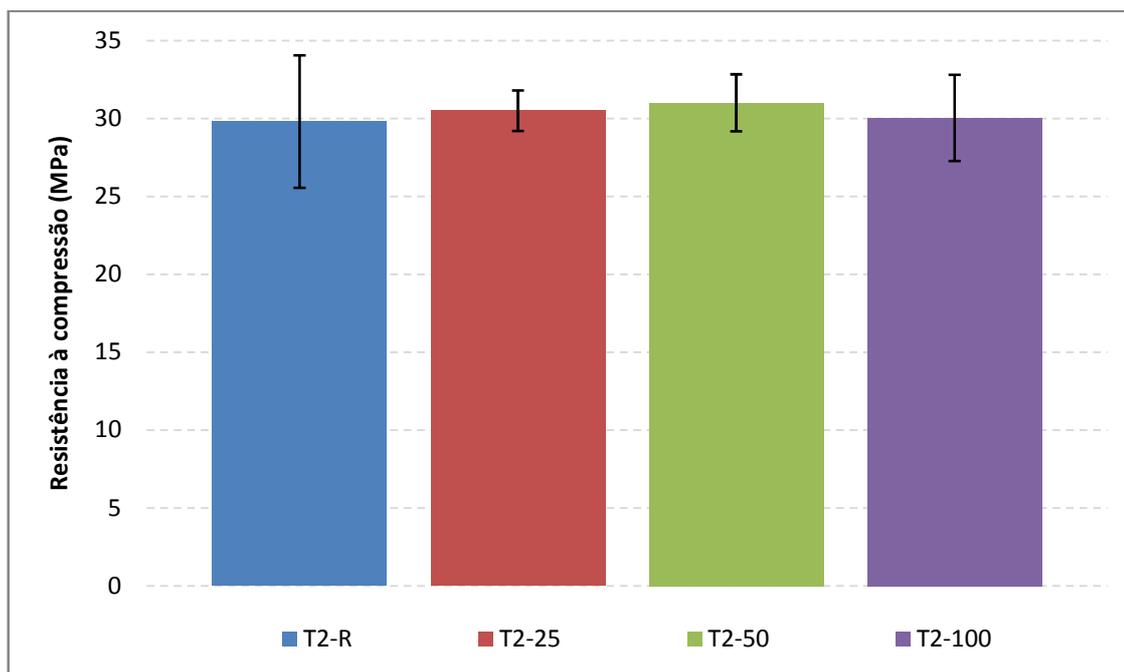
Figura 27 - Abatimento concreto Traço 2.



Fonte: AUTOR, 2017.

A Figura 28 apresenta os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova T2-R, T2-25, T2-50 e T2-100.

Figura 28 - Resistência à compressão dos CP's referente ao Traço 2.



Fonte: AUTOR, 2017

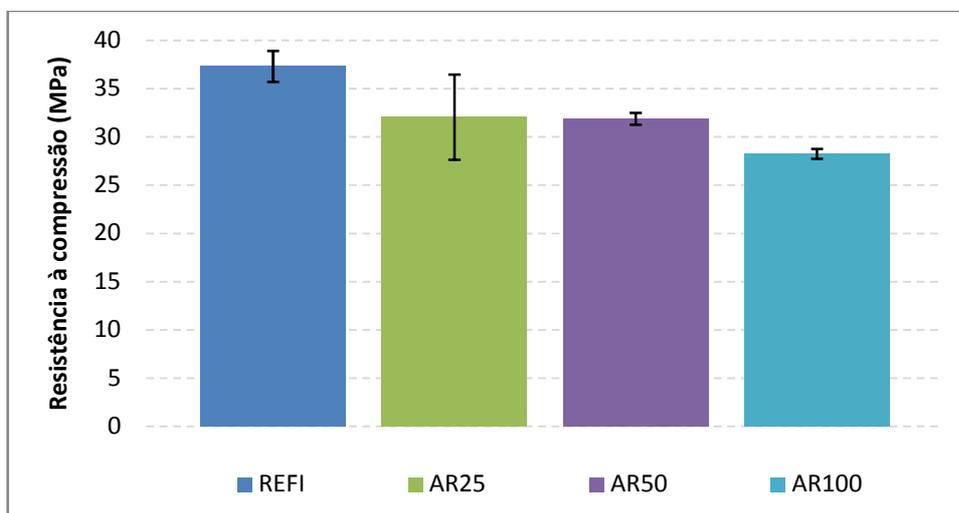
Ao analisar os resultados apresentados na Figura 28, pode-se concluir que mesmo a amostra T2-100 ter apresentando abatimento igual à zero foi possível adensar os corpos de prova e obter resistência à compressão satisfatória, adensamento justificado pelo uso do aditivo plastificante. A substituição do agregado natural por reciclado adotando o volume como referência se apresentou mais eficiente e assegurou a proporcionalidade do traço, já que o agregado reciclado apresenta massa unitária menor que do agregado natural. A resistência à compressão das amostras, ao considerar o desvio padrão, se manteve constante, resultado também observado por Soares *et al.* (2014).

#### 4.3. Caracterização do concreto

A Figura 29 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova do ensaio *POT* e de barras confinadas. Pode-se observar que não houve redução da resistência à compressão da amostra AR25 em relação à amostra REFI ao considerar o desvio padrão, já a amostra AR50 sofreu uma redução da resistência de aproximadamente 13% enquanto a amostra AR100 sofreu uma redução na resistência à compressão em comparação com a amostra REFI de aproximadamente 25%, uma das

possibilidades para essa variação pode ser à heterogeneidade do agregado reciclado.

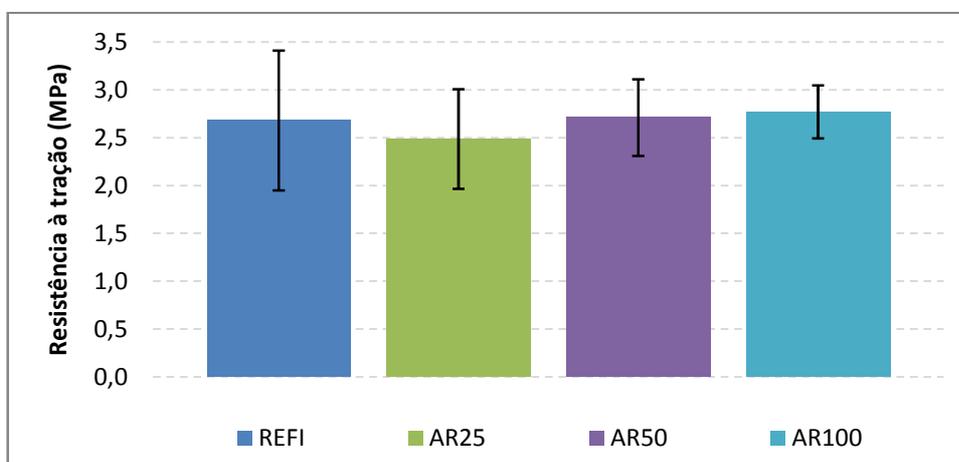
Figura 29- Caracterização do concreto quanto à resistência à compressão, utilizado nos ensaios de barras confinadas e POT.



Fonte: AUTOR, 2017.

A Figura 30 apresenta os resultados de resistência à tração obtidos no ensaio de compressão diametral do concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova do ensaio *POT* e de barras confinadas. Pode-se observar que a resistência à tração do concreto se manteve constante com a substituição do agregado gráudo reciclado por natural mesmo com a redução da resistência à compressão das amostras AR50 e AR100.

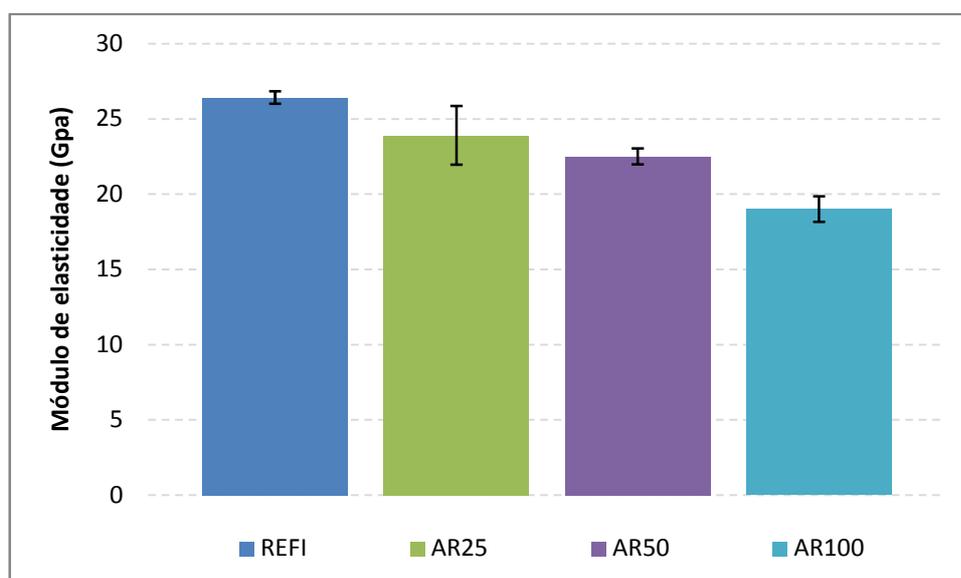
Figura 30 - Caracterização do concreto quanto à resistência à tração, utilizado nos ensaios de barras confinadas e POT.



Fonte: Autor, 2017.

A Figura 31 apresenta os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova do ensaio *POT* e de barras confinadas. Pode-se observar que a amostra AR25 apresentou resultados equivalentes a amostra de referência, a amostra AR50 apresentou uma redução de aproximadamente 11% em relação a amostra de referência e a amostra AR100 apresentou uma redução de 30% em relação a amostra de referência.

Figura 31- Caracterização do concreto quanto ao módulo de elasticidade estático, utilizado nos ensaios de barras confinadas e POT.



Fonte: AUTOR, 2017.

A melhora da interface que pode exercer melhor aderência aço concreto nos concretos com RCD não é percebida aqui. Não há ganho na resistência mecânica, por outro lado as amostras com substituição de 100% do agregado graúdo natural por reciclado não apresentam perdas significativas nas características mecânicas comparadas as do concreto de referência e a amostra com 25% de substituição do agregado graúdo natural por reciclado apresenta resultados equivalentes à amostra de referência.

#### 4.4. Ensaio de tração em barras confinadas

##### 4.4.1. Resultados dos ensaios de barras confinadas

Os resultados obtidos nos ensaios de barras confinadas com barra de aço nervurada de diâmetro igual a 10 mm aço CA-50 são apresentados na Tabela 6. A maioria dos

corpos de prova não apresentou pelo menos cinco fissuras em toda a seção transversal, conforme é exigido pela NBR 7477 (ABNT, 1982). Entretanto, ainda assim o coeficiente de conformação superficial foi calculado.

Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de barras confinadas.

Amostras	Distância média entre fissuras (cm)			Coeficiente de conformação superficial		
	Média	Des. Padrão	Coef. Var. (%)	Média	Des. Padrão	Coef. Var. (%)
REF	8,80	0,97	11,97	1,24	0,13	10,43
AR25	7,34	0,82	11,24	1,49	0,15	10,31
AR50	7,75	0,66	8,57	1,40	0,12	8,44
AR100	7,78	0,68	8,69	1,40	0,12	8,80

Fonte: Autor, 2017.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 6, referente ao ensaio de barras confinadas, percebe-se que, para todas as amostras estudadas, o coeficiente de conformação superficial não atendeu ao exigido pela norma NBR 7480 (ABNT, 2007), pois apresentaram resultados para o coeficiente de conformação superficial menor que 1,5.

O número de corpos de prova de cada amostra que atendeu a norma NBR 7477 (ABNT, 1982), apresentando pelo menos cinco fissuras em toda a seção transversal, não foi considerado representativo para as amostra de referência, amostras com 25% de substituição e amostras com 50% de substituição, sendo respectivamente apenas 20%, 30% e 40% dos corpos de prova. Para a amostra com 100% de substituição do agregado graúdo o resultado é representativo com 80% dos corpos de prova apresentando mais que cinco fissuras em toda seção transversal.

Esses resultados indicam que esse ensaio pode não ser adequado para avaliação da conformação superficial em barras de aço CA-50 com diâmetro de 10 mm. Essas considerações indicam a importância de se avaliar o desempenho de aderência, adotando-se outros ensaios, conclusão também demonstrada por Ferreira (2012).

#### 4.4.2. Cálculo da tensão de aderência através do coeficiente de conformação superficial

Conforme a Equação (2.8) proposta por Castro (2000) a Tabela 7 apresenta os resultados obtidos do cálculo da tensão de aderência através do espaçamento médio entre fissuras, obtido no ensaio de barras confinadas, e da resistência a tração do concreto.

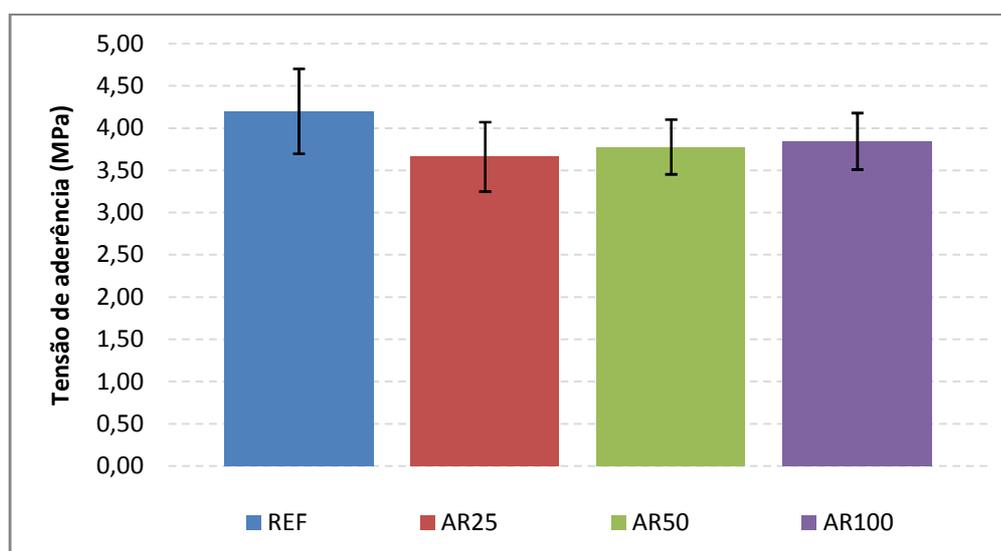
Tabela 7 - Tensão de aderência obtida pelo ensaio de barras confinadas.

Tensão de aderência de acordo com ensaio de barras confinadas			
Amostras	$f_{ctm}$ (MPa)	Distância média entre fissuras (cm)	Tensão de aderência (MPa)
Referência	3,08	7,92	4,20
25%	2,49	7,34	3,66
50%	2,71	7,75	3,78
100%	2,77	7,78	3,84

Fonte: AUTOR, 2017.

A Figura 32 apresenta o gráfico de tensão de aderência, obtida pela Equação (2.8) proposta por Castro (2000), versus a porcentagem de adição de agregado reciclado em substituição do agregado graúdo natural.

Figura 32 - Tensão de aderência obtida no ensaio de barras confinadas.



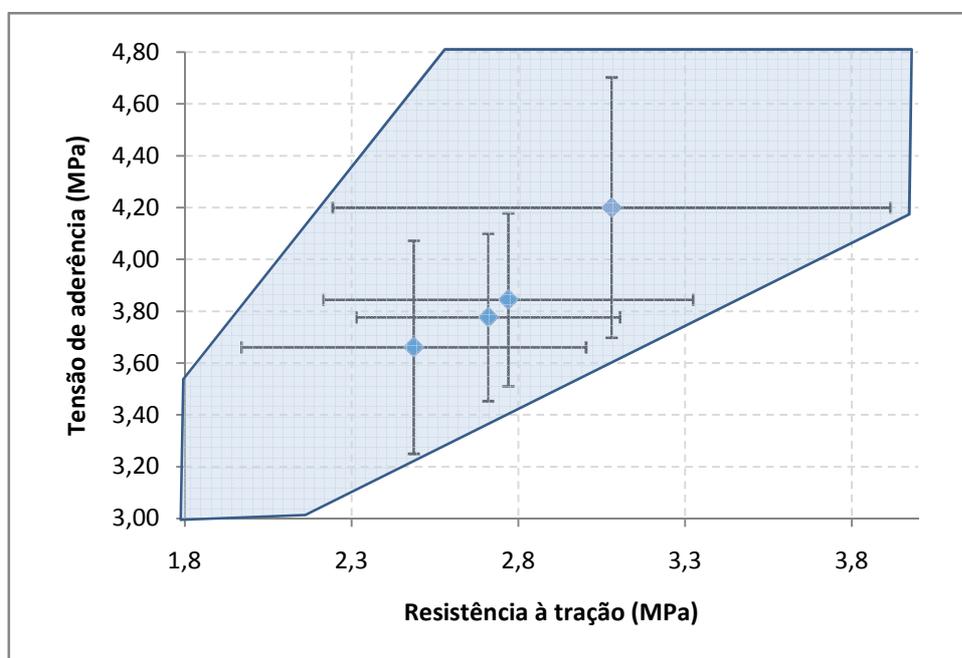
Fonte: AUTOR, 2017.

Ao analisar o gráfico da Figura 32, pode-se concluir que a tensão de aderência não sofre alteração significativa, ao se considerar o desvio padrão, com a substituição do agregado natural por reciclado, mesmo com a redução das resistências à

compressão uniaxial. Resultado previsto na literatura por Xiao e Falkner (2007) e por Prince e Singh (2013). Mas contrário às conclusões de Kim *et al.* (2015) que prevê uma redução da tensão de aderência em função da resistência à compressão do concreto.

A Figura 33 apresenta gráfico da tensão de aderência proposta por Castro (2000), versus a resistência à tração do concreto ao considerar os desvios padrões dos resultados obtidos para a resistência à tração e tensão de aderência.

Figura 33 - Gráfico de Tensão de aderência versus a resistência à tração do concreto.



Fonte: AUTOR, 2017.

Ao analisar o desvio padrão não pode-se dizer que há um aumento da tensão de aderência proporcional ao aumento da resistência a tração, mas pode-se observar uma tendência a esse comportamento conforme região sombreada.

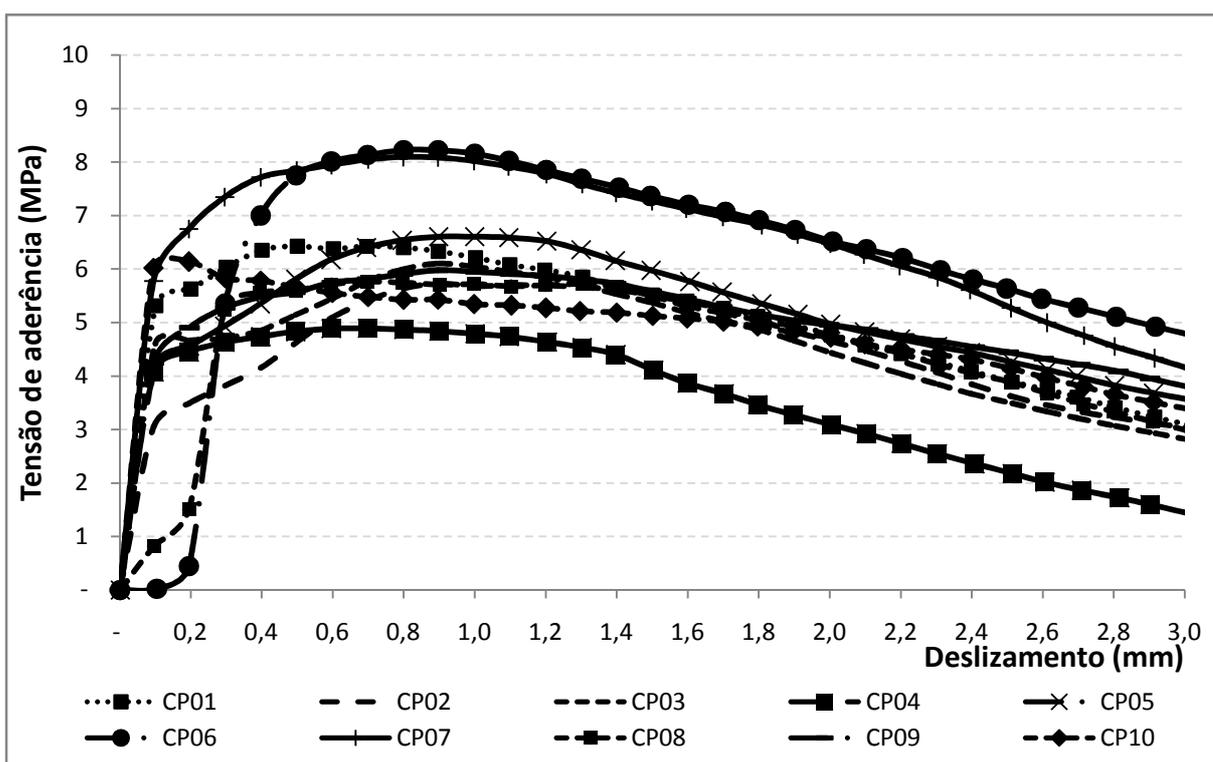
#### 4.5. Ensaio *POT*

##### 4.5.1. Resultados do ensaio *POT*

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento, as tensões de aderência máxima e média e os seus deslizamentos correspondentes.

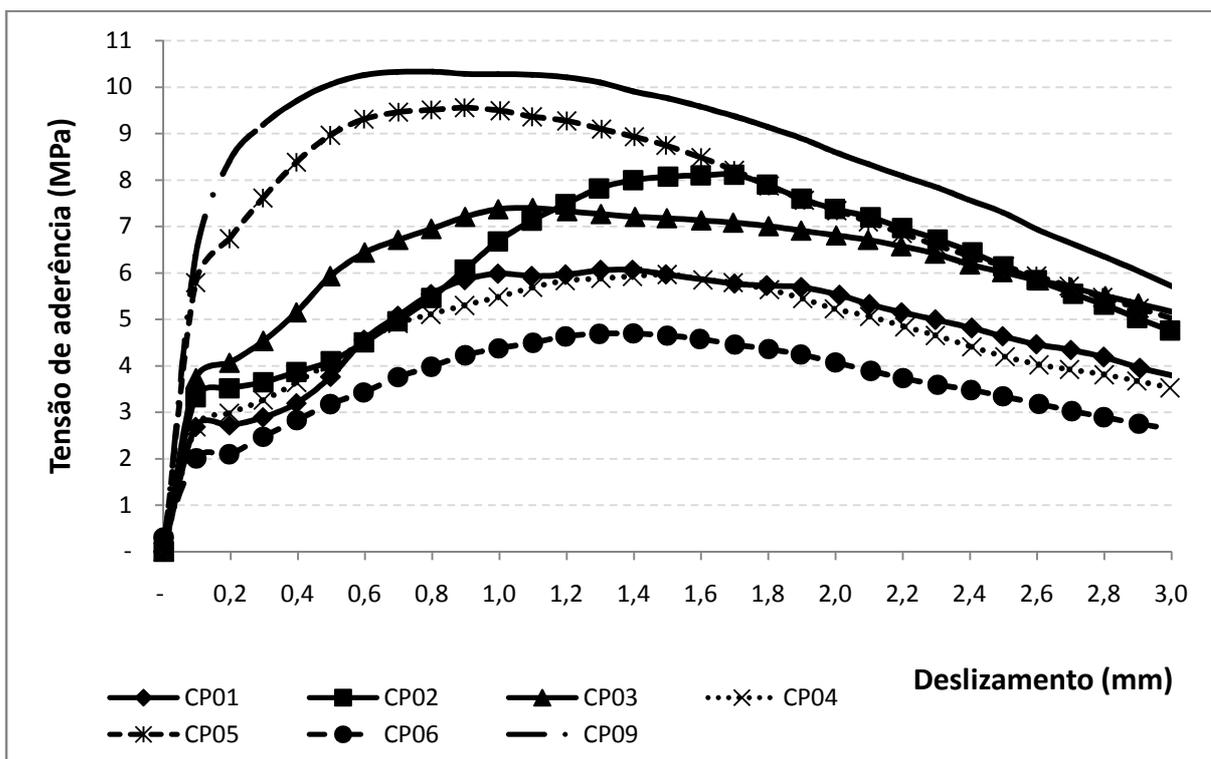
Os gráficos de tensão *versus* deslizamentos são apresentados nas Figura 32 a Figura 37. Ao analisar os gráficos pode-se concluir que as amostras AR25 e AR50 apresentaram maior dispersão de resultados, essa dispersão pode ser justificada pela presença de agregado reciclado próximo da barra em alguns corpos de prova e pela ausência desse em outros. Conforme observado por Fusco (2013) e Porto (2015) as nervuras transmitem esforços de compressão para o concreto, como a resistência mecânica do agregado reciclado misto é menor que a do agregado natural o concreto sofre uma redução na resistência à compressão, teoria comprovada nos ensaios de caracterização mecânica do concreto. A amostra AR100 por apresentar apenas um tipo de agregado graúdo tem menor dispersão já que não há variação de agregado com maior resistência ao redor da barra.

Figura 34 - Gráfico tensão versus deslizamentos para amostra REF.



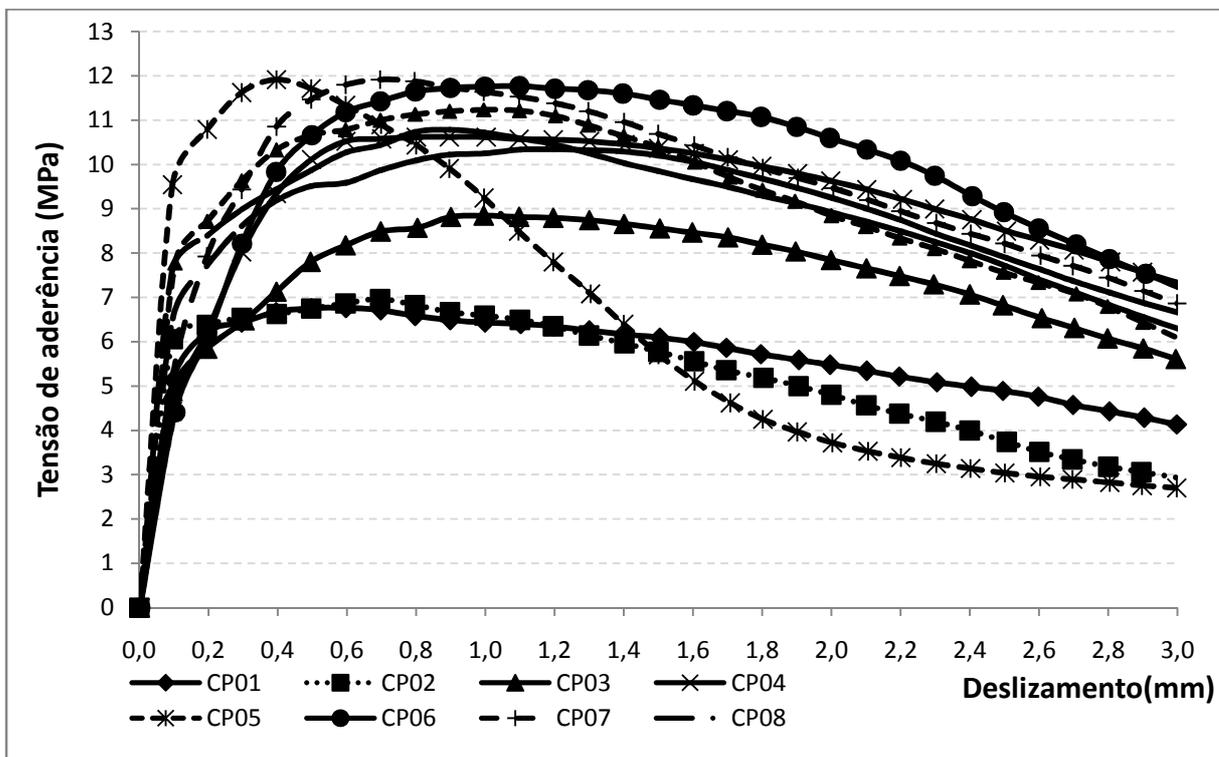
Fonte: AUTOR, 2017.

Figura 35 – Gráfico de tensão versus deslocamentos para amostras AR25.



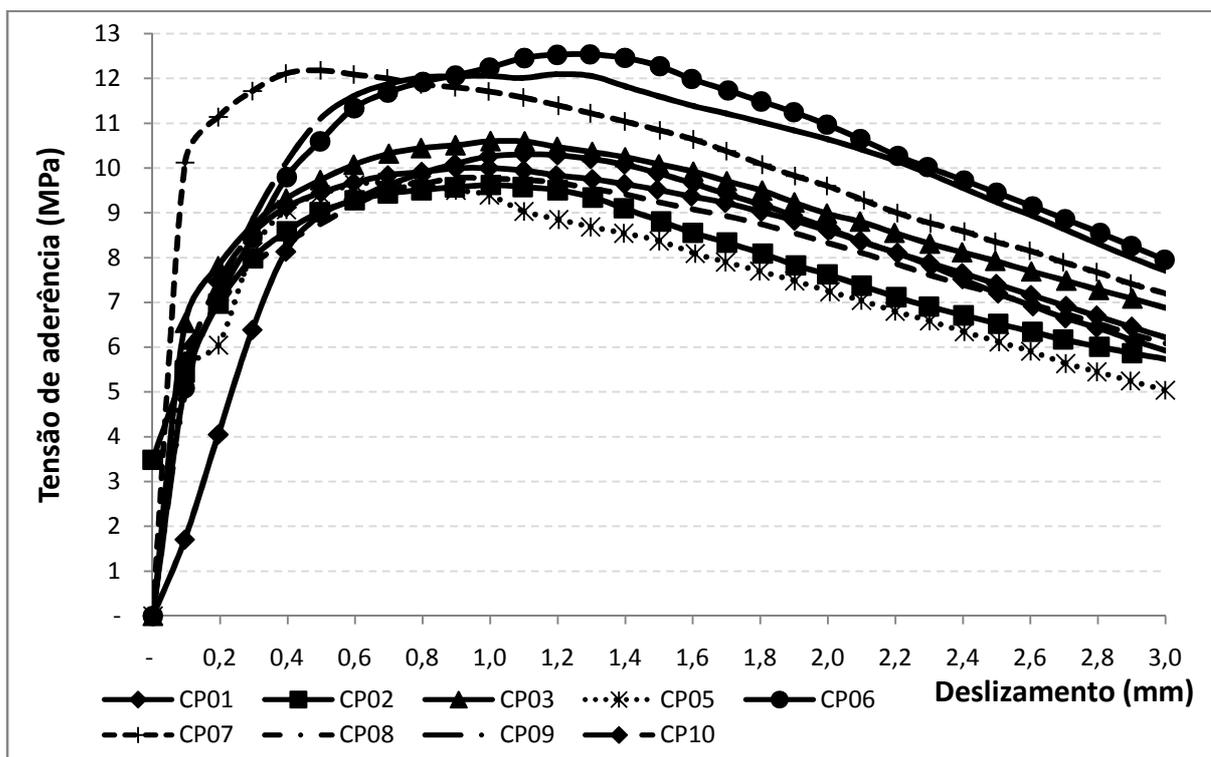
Fonte: AUTOR, 2017.

Figura 36 - Gráfico tensão versus deslocamentos para amostras AR50.



Fonte: AUTOR, 2017.

Figura 37 - Gráfico tensão versus deslizamentos para amostras AR100.

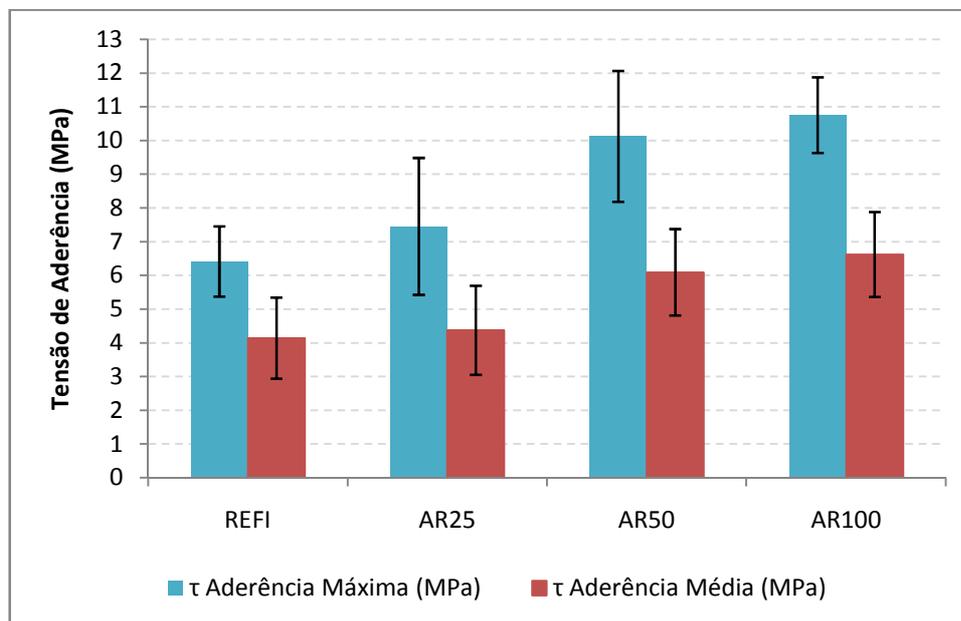


Fonte: AUTOR, 2017.

#### 4.5.2. Análise da resistência versus a porcentagem de adição de agregado reciclado

Após análise dos gráficos foram calculadas as tensões de aderência máximas e médias conforme proposto por Montoya *et al.* (1974) e França (2010). Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 38. Pode-se observar que a tensão de aderência média está a favor da segurança e por isso deve ser adotada como a tensão de aderência efetiva. Também pode-se concluir ao analisar o gráfico que a tensão de aderência não sofre influência ao substituir o agregado graúdo natural por reciclado levando em consideração o coeficiente de variação dos resultados. O comportamento observado no ensaio *POT* apresentou uma boa concordância com trabalhos pesquisados na literatura. Conforme estudos realizados por Xiao e Falkner (2007) e confirmados por Prince e Singh (2013), a aderência entre os materiais: aço e concreto; não sofre influência com a substituição do agregado natural por agregado reciclado. Mas divergem dos autores Kim (2015), Barbosa *et al.* (2008), Dumet (2003); Reyes, 2009; Tavares *et al.* (2014) que concluem que a diminuição da tensão de aderência é acompanhada pela queda na resistência à compressão.

Figura 38 - Tensão de aderência versus porcentagem de adição de agregado reciclado.

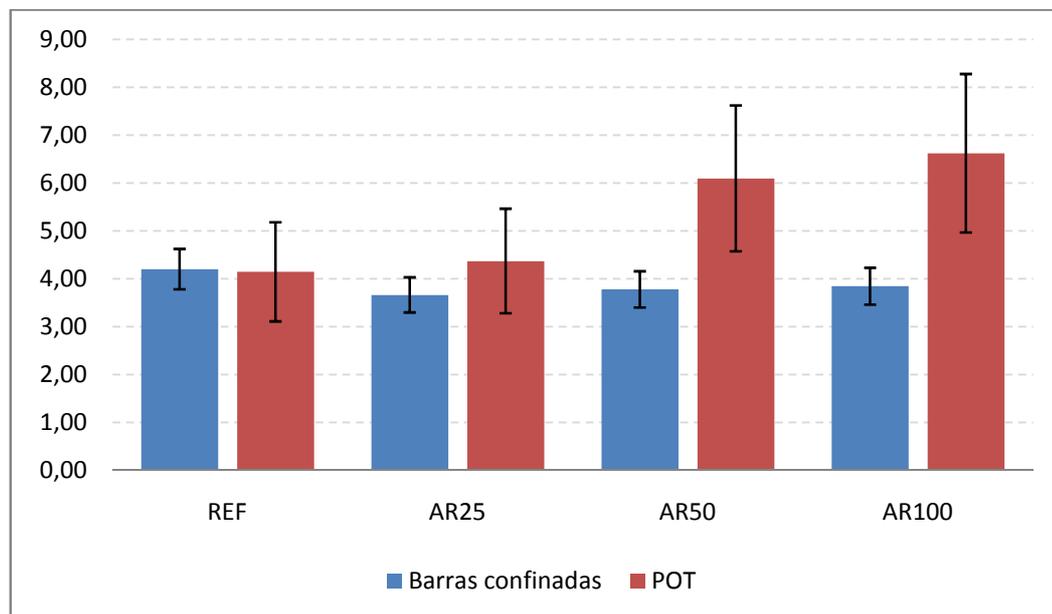


Fonte: AUTOR, 2017.

#### 4.6. Comparação entre ensaios *POT* e ensaio de barras confinadas

A Figura 39 foi criada com o intuito de comparar os resultados de tensão de aderência obtidos nos ensaios *POT* e de barras confinadas. Ao comparar os resultados obtidos nos ensaios pode-se observar que as amostras REF e AR25 apresentam resultados semelhantes em ambos os ensaios e o RCD não altera a função do agregado nestes ensaios, já nas amostras AR50 e AR100, o ensaio *POT* passar a ser mais sensível à presença do RCD do que no ensaio de barras confinadas e os resultados apresentam desempenho pouco melhor nos ensaios de arrancamento direto do que nos ensaio de barras confinadas, ao considerar o coeficiente de variação dos resultados. Pode-se notar no ensaio de barras confinadas que o RCD não altera os padrões de fissuração do concreto e os mecanismos de transferência de tensões. Já no ensaio *POT* a menor relação *a/c* devido à absorção de água pelos agregados pode resultar em uma interface aço-concreto menos porosa melhorando a aderência.

Figura 39 - Gráfico comparativo dos resultados de tensão de aderência obtidos nos ensaios de barras confinadas e *POT*.



Fonte: AUTOR, 2017.

## 5. CONCLUSÃO

Os objetivos propostos inicialmente para esta pesquisa foram alcançados e foi possível determinar o desempenho da aderência entre aço e concreto com a utilização de agregados reciclados, pois não foi verificada alteração na tensão de aderência com o acréscimo de agregados reciclados. É possível produzir concretos com 100% de agregado graúdo reciclado com resistência superior a 25 MPa, que atende a maior parte dos concretos para fins estruturais mesmo com o uso de RCD misto.

Para o ensaio de barras confinadas, os elementos das amostras que apresentaram pelo menos cinco fissuras em toda a seção transversal, conforme prescrito pela NBR 7477 (ABNT, 1982), não foi representativo dessas amostras. Ainda assim o coeficiente de conformação superficial desses corpos de prova foram calculados, entretanto, não se obteve-se valor de  $\eta$  maior que 1,5, que é o estabelecido pela norma NBR 7480 (ABNT, 2007). Esses resultados indicam que é possível que o ensaio de barras confinadas, com as especificações exigidas pela NBR 7477 (ABNT, 1982), não seja ideal para determinação do coeficiente de conformação superficial. Observação que tem sido frequente nos trabalhos realizados atualmente, também concluído por Ferreira (2012).

Pode-se notar que a resistência de aderência máxima e média, à medida que se aumenta a porcentagem de substituição do agregado natural por reciclado se manteve constante. Associou-se esse fato com o alto índice de absorção de água dos agregados reciclados, encontrados nessa pesquisa, e também descritos por Leite (2001) e Brito *et al.* (2016), que liberam a água adsorvida após a concretagem e hidratam a pasta de cimento ao redor da barra de aço, o que proporciona melhor cura da pasta e proporciona uma melhor aderência. Além do uso de aditivo plastificante que torna o composto mais denso e tende a melhorar a aderência entre os materiais constituinte.

O comportamento observado nos experimentos desta pesquisa, apresentaram similaridade com os estudos feitos por Xiao e Falkner (2007) e Prince e Singh (2013) e indica que os concretos produzidos com agregado graúdo reciclado não apresentam prejuízos em relação a tensão de aderência.

Este estudo, assim como Melo (2011), comprova que é preciso melhorar as condições de produção do agregado reciclado, para se obter um material com melhores características, classificado como ARC de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004), para uma utilização mais valorizada. Apesar de obter bons resultados em relação à tensão de aderência, o agregado reciclado não atendeu a características mínimas estipuladas pela Lnecc (2006) que estabelece que os agregados reciclados para produção de concreto para fins estruturais deve ter no mínimo 90% de resíduos de concreto. Uma vez que, o material obtido na usina da BR-040 se enquadra como agregado tipo ARM, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004), onde o somatório dos percentuais dos grupos 1 e 2 são menores que 90%.

## 6. REFERÊNCIAS

ABRECON. **Curso de Gestão Integrada Resíduos da Construção Civil e operação de usina de reciclagem de entulho.** Disponível em: [https://issuu.com/sanchocom/docs/cartilha-curso11ed\\_abrecon](https://issuu.com/sanchocom/docs/cartilha-curso11ed_abrecon). Acesso em 17 de setembro de 2017.

ALMEIDA FILHO, F. M. (2006). Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis. Tese de doutorado. São Carlos, EESC - SET (USP), 2006. 310p.

ANGULO, Sérgio Cirelli et al. Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 61-73, 2013.

ANGST, U. et al. The steel–concrete interface. **Materials and Structures**, Dordrecht, v. 50, n. 2, p. 1-24, 2017

ARAÚJO, D. L.; DANIN, A. R.; MELO, M. B.; RODRIGUES, P. F. Influence of steel fibers on the reinforcement bond of straight steel. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais - RIEM, v.6, n.2, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014. 120 p. 2014. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf> . Acesso em: 07 jan. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46 – **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 51 –**Agregado graúdo - Ensaio de abrasão“Los Angeles”.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53 – **Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 – **Agregados - Determinação da composição granulométrica– Agregado**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – **Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – **Projetos de Estruturas de Concreto, Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 - **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 – **Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480 – **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7477 – **Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial de Barras e Fios de Aço Destinados a Armaduras de Concreto Armado – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 - **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva tensão-deformação**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776 - **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em**

**pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2004.

B.A.E.L. 91 (2000). **Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions em béton armé, suivant la méthode des états limites. Troisième tirage, 328 pages, Éditions Eyrolles.** Paris, 2000.

BARBOSA, Maria Teresa Gomes et al. Analysis of the relative rib area of reinforcing bars pull out tests. **Materials Research**, v. 11, n. 4, p. 453-457, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 307, de 05 de Julho de 2002. Dispõe sobre a gestão de resíduos da construção civil. [Brasília], 2002.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil.** Cerâmica, v. 61, p. 178-189, 2015.

BRITO, J. de et al. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 1-16, 2016.

BRODERSEN Jens; JUUL, Jacob; JACOBSEN, Henrik (org.). European Environment Agency – EEA. Review of selected waste streams: Sewage sludge, construction and demolition waste, waste oils, waste from coal-fired power plants and biodegradable municipal waste. [Copenhagem], 2002. 48p.

CARELI, E. D. A Resolução CONAMA nº 307/2002 e as novas condições para gestão dos resíduos de construção e demolição. **São Paulo**, v. 154, 2008.

CASTRO, Protasio F. Notas sobre Estudo da Aderência Aço-Concreto. **Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro**, 2000.

CHUNG, Shan-shan; LO, Carlos WH. Evaluating sustainability in waste management: the case of construction and demolition, chemical and clinical wastes in Hong Kong. **Resources, conservation and recycling**, v. 37, n. 2, p. 119-145, 2003.

DUMÊT, Tatiana Bittencourt. **Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

EUROPEAN PARLIAMENT. **Directive 2006/12/EC of the European Parliament and of the Council of April 2006 on Waste**. 2006. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0009:0021:PT:PDF> . Acesso em: 16setembro. 2017.

FERREIRA, E. G. P. **Contribuição ao estudo de aderência aço-concreto em barras lisas, entalhadas e nervuradas, com diâmetros entre 5,0 e 10,0 mm.** . 2012. 145p. Dissertação (Mestrado) PPGEC Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FRANÇA, M. B. B. **Estudo experimental da aderência aço-concreto para barras finas de aço CA-50**. 2010. 80p. Dissertação (Mestrado) PPGEC, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. Pini, 2013.

KIM, Sun-Woo et al. Bond strength prediction for deformed steel rebar embedded in recycled coarse aggregate concrete. **Materials & Design**, v. 83, p. 257-269, 2015.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001.

LIMA, José Antonio Ribeiro. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LNEC, E. 471 Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. **Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal**, 2006.

LOVATO, Patrícia Silveira. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.** 2007.

MELO, Adriana Virgínia Santana. **Diretrizes para a produção de agregados reciclados em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil.** 2011. 232f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Roseback; ANGULO, Sérgio Cirelli; CARELI, Elcio D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído, Porto Alegre**, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

MONTOYA, P. J.; MESEGUER, A. G.; CABRÉ, F. M. **Hormigon Armado.** Barcelona: 1974.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.**, São Paulo: PINI 1997.

OLIVEIRA, Márcio Joaquim Estefano de; ASSIS, Cássia Silveira de. Aderência do aço-concreto produzido com agregado reciclado. **Exacta**, v. 4, n. 1, 2006.

PAVÓN, Elier; MARTÍNEZ, Iván; ETXEBERRIA, Miren. The production of construction and demolition waste material and the use of recycled aggregates in Havana, Cuba. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 71, p. 167-178, 2014.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** São Paulo, v. 189, 1999.

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle. **Curso básico de concreto armado.** Oficina de Textos, 2015.

PORRAS, Álvaro Chávez; LEÓN, Óscar Palacio; CORTÉS, NatalyLorena Guarín. Unidad logística de recuperación de residuos de construcción y demolición: Estudio de caso Bogotá DC. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, v. 23, n. 2, 2013.

PRINCE, M. John Robert; SINGH, Bhupinder. Bond behaviour of deformed steel bars embedded in recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 852-862, 2013.

REYES, FEG. **Análise da aderência entre barras de aço e concretos (CC, CAA e CAAFA) sob influência de ações monotônicas e cíclicas.** 215p. 2009. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

RIBEIRO, Jose Luis Duarte. Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas. 1985.

RILEM-CEB-FIP-RC6. **Bond Test for Reinforcement: Pull Out Test** Concrete Reinforcement Technology Paris: Georgi Publishing Company 1992.

SALAZAR, Rafael Andres Robayo et al. **Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento.** *Tecnura*, v. 19, n. 44, 2015.

SINDUSCON-MG; SENAI-MG. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil. Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil.** 3º. Ed. Rev. e Aum. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 2008. 72p. CDU: 628.544: 624 – CONSTRUÇÃO CIVIL – RESÍDUOS SÓLIDOS.

SOARES, D. et al. Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: mechanical and durability performance. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 263-272, 2014.

SÖYLEV, Tayfun A.; FRANCOIS, Raoul. Effects of bar-placement conditions on steel-concrete bond. **Materials and structures**, v. 39, n. 2, p. 211-220, 2006.

TAVARES, Alysson José et al. Aderência aço-concreto: simulação numéricadosensaios de arranchamento pull-out e APULOT usando o programa ATENA. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, p. 138-157, 2014.

TENÓRIO, Jonathas Juda Lima et al. **Concreto produzido com agregado reciclado.** RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal, v. 5, n. 5, 2012.

TESSARO, Alessandra Buss; DE SÁ, Jocelito Saccol; SCREMIN, Lucas Bastianello. **Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil e**

**demolição no município de Pelotas, RS.** *Ambiente Construído*, v. 12, n. 2, p. 121-130, 2012.

TORRE-CASANOVA, Anaëlle et al. Confinement effects on the steel–concrete bond strength and pull-out failure. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 97, p. 92-104, 2013.

VIEIRA, Geilma L.; DAL MOLIN, Denise CC; LIMA, F. B. Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. **Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho**, v. 19, p. 5-18, 2004.

XIAO, Jianzhuang; FALKNER, H. Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 395-401, 2007.

WADA, Patrycia Hanna. **Estudo da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto para uso em estacas moldadas in loco.** 2010. 108 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2010.