

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TAMIRIS EVANGELISTA MARTINS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE
DIFERENTES CONCRETOS NA ADERÊNCIA COM A ARMADURA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

TAMIRIS EVANGELISTA MARTINS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE
DIFERENTES CONCRETOS NA ADERÊNCIA COM A ARMADURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do grau de Bacharel do curso de Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do Campus Curitiba.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE DIFERENTES CONCRETOS NA ADERÊNCIA À TRAÇÃO COM A ARMADURA

Por

Tamiris Evangelista Martins

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, defendido e aprovado em 24 de junho de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Wellington Mazer, Dr.
Orientador
UTFPR

Amacin Rodrigues Moreira, MSc.
UTFPR

Elisabeth Penner, Dra.
UTFPR

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força, fé, saúde e paciência para superar os tantos obstáculos encontrados ao longo desta jornada.

Aos meus queridos pais Elisa e Reinaldo, por todo o apoio e dedicação em minha formação, por sempre acreditarem nos meus sonhos e por me ajudarem a realizar todos meus projetos.

Aos meus queridos amigos que estiveram comigo durante todos esses anos tanto nos momentos bons quanto nos ruins.

Ao meu irmão Tallis, e a toda a minha família pelo o apoio e encorajamento.

Ao meu namorado Alexandre por estar ao meu lado me apoiando e ajudando em todas as etapas deste processo.

Ao meu orientador professor Wellington Mazer pela orientação, incentivo e ajuda na realização deste estudo.

Aos professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo

Aos técnicos do Laboratório, pelo empenho e auxílio na execução dos ensaios.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

"A mente que se abre a uma nova ideia
jamais volta ao seu tamanho original."

Albert Einstein

RESUMO

MARTINS, T. E. **Análise da influência da resistência à compressão de diferentes concretos na aderência com a armadura.** 2016. 49 pp. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

Nas últimas décadas, o concreto tornou-se o material mais utilizado na construção civil. O concreto armado, objeto de estudo deste trabalho, é uma estrutura de concreto que possui uma armadura com barras de aço em seu interior. Sua função é resistir aos esforços de compressão, e a do aço resistir à tração. A aderência é a responsável por garantir que esses dois elementos distintos, concreto e aço, trabalhem de forma conjunta para resistir aos esforços aos quais forem solicitados. Este trabalho visa analisar a influência que a resistência à compressão do concreto confere na aderência do conjunto aço-concreto. Realizando o ensaio de arrancamento direto, o *PULL-OUT-TEST (POT)* que se caracteriza por um ensaio de tração. Os concretos especiais CAA, CAD e CPR possuem uma melhor seleção de materiais, delimitando a dimensão do agregado graúdo, utilizam aditivos e compostos que fazem com que a quantidade de vazios dentro da estrutura de concreto seja bem menor do que em concretos convencionais. Portanto esses concretos especiais possuem uma resistência à compressão maior do que o convencional, analogamente uma maior resistência à compressão implica em maior resistência de aderência.

Palavras chaves: Aderência. Arrancamento direto. Concreto auto adensável. Concreto alto desempenho. Concreto pós reativo.

ABSTRACT

MARTINS, T. E. **Analysis of the influence of the compressive strength of various reinforced concrete. 2016.** 49 pp. Final Course Assignment (Bachelor of Civil Engineering) – Federal University of Technology - Paraná, 2016.

In recent decades, concrete has become the most commonly used material in construction. The reinforced concrete, study object of this work, is a concrete structure which has a reinforcement with steel bars inside. Its function is to resist the compressive forces and the steel function is to resist tensile. Compliance is responsible for ensuring that these two distinct elements, concrete and steel, work together to resist the efforts to which they are requested. This work aims to analyze the influence of the strength of concrete compression gives the grip of steel-concrete set. Realizing the pull-out-test, which is characterized by a tensile test. The special concretes SCC, HPC and RPC have a better selection of materials, limiting the size of the coarse aggregate, used additives and compounds which cause the amount of voids in the concrete structure are much smaller than conventional concretes. Therefore these special concretes have a greater resistance to compression than conventional one, analogously greater compressive strength results in higher bond strength.

Key words: Adherence. Pullout test. Self compacting concrete. High performance concrete. Reactive powders concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Situações de boa e má aderência para armaduras horizontais	24
Figura 2 - Ensaio de arrancamento direto	26
Figura 3 - Modelo esquemático do corpo de prova	28
Figura 4 - Moldes montados antes da concretagem	29
Figura 5 - Corpo de prova concretados para ensaio de arrancamento.....	30
Figura 6 - Configuração do ensaio de arrancamento direto.....	32
Figura 7 - Configuração do ensaio de compressão axial	33
Figura 8 - Ruptura do corpo de prova de concreto convencional	39
Figura 9 - Ruptura do corpo de prova de concreto auto adensável.....	40
Figura 10 - Ruptura do corpo de prova de concreto alto desempenho	40
Figura 11 - Ruptura do corpo de prova de concreto pós reativo	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Traços dos concretos	31
Tabela 2 - Tensão de aderência calculada pela expressão 9.3.2.1 da NBR 6118/2014.....	34
Tabela 3 - Tensão de aderência do ensaio de arrancamento direto para o concreto convencional	35
Tabela 4 - Tensão de aderência do ensaio de arrancamento direto para o concreto auto adensável ..	35
Tabela 5 - Tensão de aderência do ensaio de arrancamento direto para o concreto alto desempenho	36
Tabela 6 - Tensão de aderência do ensaio de arrancamento direto para o concreto pós reativo	36
Tabela 7 - Comparação dos resultados obtidos em ensaio com os resultados calculados pela equação.....	36
Tabela 8- Tensões na armadura - Concreto convencional	37
Tabela 9 - Tensões na armadura - Concreto auto adensável	38
Tabela 10 - Tensões na armadura - Concreto de alto desempenho	38
Tabela 11 - Tensões na armadura - Concreto pós reativo.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão <i>versus</i> deformação do concreto convencional	48
Gráfico 2 - Tensão <i>versus</i> deformação do concreto auto adensável	48
Gráfico 3 - Tensão <i>versus</i> deformação do concreto alto desempenho.....	49
Gráfico 4 - Tensão <i>versus</i> deformação do concreto pós reativo.....	49

LISTA DE ABREVIACOES

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAA	Concreto Auto Adensável
CAD	Concreto Alto Desempenho
CPR	Concreto Pós Reativo
POT	<i>Pull-out-test</i>
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
SCC	<i>Self Compacting Concrete</i>
HPC	<i>High Performance Concrete</i>
RPC	<i>Reactive Powders Concrete</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	13
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	13
1.3	OBJETIVO GERAL	14
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.5	JUSTIFICATIVA	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	CONCRETO ARMADO	15
2.2	CONCRETO AUTO ADENSÁVEL (CAA).....	16
2.3	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD)	19
2.4	CONCRETO PÓS REATIVO (CPR)	20
2.5	ADERÊNCIA.....	22
2.6	<i>PULL-OUT TEST</i>	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	VALIDADE DA EXPRESSÃO 9.3.2.1 DA NBR 6118/2014	34
4.2	RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA	39
5	CONCLUSÕES	42
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE TENSÃO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO.....	48

1 INTRODUÇÃO

O concreto um é material amplamente conhecido e é encontrado em quase todos os lugares, desde grandes construções como pontes, usinas, edifícios, aeroportos, *shoppings*, como também em residências com fechamento em alvenaria ou *drywall*.

Nas últimas décadas tornou-se o material mais utilizado na construção civil sobressaindo-se em relação a outros elementos estruturais, tais como estruturas metálicas e de madeiras. O concreto tem a capacidade de assumir diversos formatos, além de ser uma opção economicamente viável. Além disso, existem diversos tipos de concreto disponíveis no mercado hoje em dia se adequando as mais variadas necessidades. Como exemplo, é possível citar: concreto projetado, que é utilizado no revestimento de túneis e contenção de encostas e concreto rolado, que é utilizado como sub-base para pavimentação. Assim como o concreto leve, que possui como agregado isopor ou argila expandida e é utilizado para fabricação de blocos e enchimento de lajes; entre outros (PEDROSO, 2009; REDIMIX, 2015).

Entre 2005 e 2012, enquanto o consumo de cimento avançou mais de 80%, o aumento do concreto preparado em centrais foi de 180%. Estima-se que as usinas de concreto tenham produzido 51 milhões de m³ de concreto no ano de 2012. Esta é uma das conclusões da pesquisa realizada em parceria pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), e inteligência UBM *Brazil* para traçar um perfil e projetar tendências para o setor (ABCP, 2013).

O concreto armado, que é o objeto de estudo deste trabalho, é uma estrutura de concreto que possui uma armadura com barras de aço em seu interior. Tanto o traço do concreto quanto a quantidade, espessura e disposição das barras de aço são previstos em projeto. O concreto tem como função resistir aos esforços de compressão, e as funções do aço são resistir à tração e proporcionar certa maleabilidade a estrutura (LIBERATI; LEONEL; NOGUEIRA, 2014; CONCRETO, 2015).

Em se tratando de concreto armado a aderência é um dos principais fatores a ser estudado, pois ela é a responsável por garantir que esses dois elementos distintos, concreto e aço, trabalhem de forma conjunta para resistir aos esforços aos

quais forem solicitados e garanta o bom desempenho do elemento estrutural (TAVARES, 2012).

Conseqüentemente, constata-se a importância de estudar a aderência da armadura nos elementos de concreto armado, uma maior compreensão de como esse mecanismo funciona possibilita determinar padrões de comportamento. Possibilitando assim, estabelecer regras para os cálculos de dimensionamentos das armaduras, das ancoragens, das emendas e das cargas que a estrutura é capaz de resistir (CASTRO, 2002).

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

No presente trabalho será estudada a validade da expressão 9.3.2.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) para os seguintes tipos de concreto: concreto auto adensável (CAA), concreto pós-reativo (CPR) e concreto de alto desempenho (CAD). O estudo será feito tomando como base o concreto convencional, que é concreto utilizado para estabelecer os requisitos da norma. Além disso, também serão analisadas as tensões de aderência aço-concreto e as formas de ruptura dos corpos de prova, por meio de ensaio em laboratório. Para a realização dos ensaios serão feitos corpos de prova de dimensões pré-definidas, com uma barra de aço nervurada e ancoragem reta.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O concreto armado funciona devido à ação da aderência que há entre o concreto e o aço. O mau desempenho do conjunto pode acarretar problemas sérios na estrutura, chegando até a ruptura do elemento estrutural e posterior colapso podendo gerar tanto danos materiais quanto físicos.

A premissa deste trabalho é de que os concretos especiais, devido as suas diferentes características, podem alcançar um maior nível de aderência se comparado ao concreto convencional. Caso a hipótese seja confirmada, será possível diminuir o comprimento de ancoragem em relação ao que se utiliza atualmente nas obras, resultando assim em uma economia.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é analisar a influência que a resistência à compressão do concreto confere na aderência do conjunto formado entre a armadura e o concreto.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente trabalho consistem em:

- Analisar a forma de ruptura dos corpos de prova;
- Verificar a validade da expressão 9.3.2.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) para CAD, CPR e CAA;
- Analisar as tensões de aderência aço-concreto no CAD, CPR e CAA.

1.5 JUSTIFICATIVA

O grande desenvolvimento das técnicas das construções, o avanço na tecnologia de materiais e de métodos estruturais mais modernos mostra a necessidade de que se conheça o real desempenho da estrutura de concreto armado. Principalmente quando se trata da aderência do conjunto aço-concreto, uma vez que, nessa interface a transferência de esforços de um material para o outro tem que ser ideal.

A relevância deste trabalho se dá pelo fato de a aderência ser um fenômeno complexo que envolve materiais com características distintas. Portanto, quanto maior for o conhecimento adquirido sobre esse assunto, ficará mais simples prevenir os incidentes que um mau funcionamento no conjunto pode causar a construção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentada uma sucinta revisão de conceitos sobre concreto armado, concreto auto adensável, concreto de alto desempenho e concreto pós reativo; bem como aderência aço-concreto e o ensaio de arrancamento, *pull-out-test*.

2.1 CONCRETO ARMADO

O cimento Portland, como é conhecido atualmente foi desenvolvido em 1824 com as pesquisas feitas por Joseph Aspdin, que tinha a intenção de aperfeiçoar o método existente na época para a produção da pedra artificial. Este método havia sido inventado, em 1817, pelo engenheiro Louis Vicat, que é considerado o criador do cimento artificial. Entretanto, o início das descobertas sobre o cimento se deu devido a pesquisas dos engenheiros James Parker e John Smeaton, ainda no século 18 (CARVALHO, 2008).

A história do concreto armado teve início no ano de 1849 quando o agricultor francês Joseph-Louis Lambot construiu um barco utilizando argamassa e reforçando-a com ferro, e o apresentou oficialmente em uma feira em Paris no ano de 1855. O comerciante Joseph Monier viu naquele material uma possibilidade de substituir o que utilizava na fabricação de vasos, criando um produto mais resistente. A partir disto, Monier iniciou a elaboração de vários objetos e estruturas em concreto armado como tanques, reservatórios, pontes e passarelas, entre outros e as patenteou. Alguns anos mais tarde, o engenheiro alemão Gustav Adolf Wayss comprou as patentes de Monier, aperfeiçoando-a para a utilização na construção civil, com isso construiu edifícios na Alemanha, Áustria e França. O trabalho de Wayss contribuiu muito para a expansão do uso do concreto armado nas construções (VASCONCELOS, 1985).

O concreto armado no Brasil teve seu início em 1901, com a construção da galeria de águas no Rio de Janeiro, seguido pela construção de residências em 1904. A primeira ponte foi construída em 1908, possuindo um vão de 9m e o primeiro edifício em 1907 na cidade de São Paulo, com uma altura de três pavimentos (BASTOS, 2014).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a definição de concreto armado é:

Aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre o concreto e a armadura, e nos quais não se aplica alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência (ABNT, 2014).

Para ser considerado um bom material estrutural é preciso que este apresente boa resistência e durabilidade. O concreto é um material que apresenta uma alta durabilidade e boa resistência à compressão, entretanto ele possui uma baixa resistência à tração, o que evidencia uma necessidade de combiná-lo com outro material que resista bem a tração, o aço. O aço é um material que possui boa resistência tanto à tração quanto a compressão, um conjunto de barras de aço, posicionadas estrategicamente, e envolvidas com o concreto dá origem ao concreto armado (BASTOS, 2014).

O concreto armado possui várias vantagens, entre elas o poder de assumir variadas formas e ser utilizado nos mais diversos tipos de obra. Dentre suas vantagens estão a boa durabilidade, o baixo custo e a boa resistência à compressão, que são características do concreto. Associado a isso estão à ductilidade e resistência à tração e compressão, que são características provenientes do aço. Outro ponto importante é que, com o dimensionamento adequado, o aço fica protegido contra corrosões, e também contra incêndios, durante certo tempo (BASTOS, 2014).

2.2 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL (CAA)

O concreto auto adensável (CAA), surgiu no Japão devido da necessidade de se obter estruturas mais duráveis que dispensassem o trabalho de vibração ou adensamento mecânico (ALMEIDA FILHO, 2006).

O Japão, sendo um país que sofre com uma grande quantidade de abalos sísmicos, tem em suas estruturas de concreto uma demanda alta na taxa de aço, o que pode atrapalhar na fluidez do concreto através da forma. Para obter um concreto armado de qualidade, resistente e durável é preciso que o concreto seja bem compactado, esse tipo de compactação é obtido através de vibração ou adensamento mecânico na execução da estrutura. O trabalho demanda mão de obra especializada o que, na época, estava cada vez mais difícil de encontrar no país,

além de alto custo e tempo. Nesse cenário o professor japonês Okamura desenvolveu estudos para um concreto que não precisasse de vibração mecânica, compactando-se com seu peso próprio (ALMEIDA FILHO, 2006; PALARETI, 2009, OKAMURA; OUCHI, 2003).

A primeira combinação do CAA foi realizada em 1988, com materiais já existentes no mercado. O protótipo de teste teve resultados satisfatórios em relação a retração de secagem e endurecimento, calor de hidratação, densidade após o endurecimento, entre outros. Este concreto foi chamado de “concreto de alta performance”, com os seguintes estágios:

- Fresco: alta adensabilidade;
- Idade recente: redução de defeitos iniciais;
- Após endurecimento: proteção contra agentes externos.

No entanto, essa denominação (concreto de alta performance) já havia sido utilizada na para caracterizar outro tipo de concreto, um concreto de alta resistência à compressão e de alta durabilidade, por causa da pequena relação água-cimento. Assim, o nome foi mudado para “concreto de alta resistência auto adensável” (OKAMURA; OUCHI, 2003).

O concreto auto adensável se caracteriza por ter uma baixa relação água-cimento, pelo uso de aditivos superplastificantes e por limitar o tamanho do agregado graúdo. A limitação do tamanho do agregado se faz necessária, pois, a energia exigida para que o concreto flua na forma é consumida pela tensão interna que existe entre o agregado e a armadura. Isto resulta no aparecimento de blocos de partículas de agregado que impedem a passagem da argamassa. Esse problema não ocorre se o tamanho do agregado for limitado a uma dimensão menor do que a normalmente utilizada (OKAMURA; OUCHI, 2003).

A baixa relação água-cimento que o CAA possui é alcançada pela adição de aditivos superplastificante, formando uma pasta de alta viscosidade. Essa mistura contribui para evitar os blocos de agregados e também auxilia na resistência à segregação entre o agregado e a pasta de argamassa (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Segundo o EFNARC (2002) para ser classificado como CAA, o concreto precisa atender, no estado fresco, as propriedades de fluidez, habilidade passante e resistência à segregação. Definindo fluidez como a habilidade do concreto auto adensável de fluir para dentro da forma preenchendo completamente todos os espaços, usando apenas o seu peso próprio. Habilidade passante como a habilidade

de fluir através da forma por entre as barras de reforço, sem que haja segregação ou bloqueio. E por fim, a resistência à segregação como a capacidade do CAA de se manter homogêneo durante todo o transporte e a concretagem.

No Brasil o CAA é regulamentado pela NBR 15823 (ABNT, 2010), a norma define esse tipo de concreto como:

Concreto que é capaz de fluir, auto adensar pelo seu peso próprio, preencher a forma e passar por embutimentos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade, ausência de segregação, nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (ABNT, 2010).

A norma está dividida em seis partes, na primeira parte são definidos os requisitos para a classificação do CAA no estado fresco e as metodologias de ensaios. Também são determinados os termos utilizados, a classificação do material segundo seu comportamento e desempenho, estabelece os ensaios que obrigatoriamente têm de ser realizados. As demais partes descrevem e detalham os ensaios exigidos.

Dentre as principais vantagens do CAA estão a redução do custo de aplicação por metro cúbico de concreto e a garantia de um ótimo acabamento em peças de concreto aparente. O CAA permite o bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais, otimizando a mão de obra. Com isso, obtêm-se maior rapidez na execução da obra, eliminação da necessidade de vibração e espalhamento. O que aumenta a gama de possibilidades de trabalho com formas em tamanhos pequenos e reduz o custo final da obra em comparação ao sistema convencional de concretagem (SILVA 2012, apud CAMARGOS, 2002).

Para se tornar um material cada vez mais viável existe uma busca contínua para obter o CAA com diferentes materiais, o uso desses materiais pretende contornar algumas desvantagens que esse tipo de concreto apresenta. Está entre as desvantagens apresentadas a necessidade de mão de obra especializada, que nem sempre é encontrada; controle tecnológico e aplicação; maior necessidade de controle do que o concreto convencional. São necessários cuidados diferenciados com o transporte para evitar a segregação, e também devido ao menor tempo disponível para aplicação em relação ao concreto convencional (LISBÔA, 2004).

2.3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD)

Até meados da década de 60 a maioria dos projetistas estava satisfeito em projetar estruturas com resistências entre 15 e 20 MPa, que se mostravam seguras e econômicas. As construções eram basicamente horizontais, e os construtores estavam ganhando um bom dinheiro com aquele tipo de construção, o que não demandava dos engenheiros grande empenho em criar um novo tipo de edificação que fosse resistente o suficiente para crescer em altura. Mas como em qualquer ramo da atividade humana, sempre há pessoas com ideias inovadoras que revolucionam a forma de pensar e agir. No início dos anos 60, na cidade de Chicago, um projetista e um produtor de concreto começaram a trabalhar em conjunto para criar um novo tipo de material, que apresentasse uma resistência à compressão muito superior aos padrões da época (AÏTCIN, 1998).

É importante lembrar que o cimento utilizado na época tinha uma granulometria maior do que o que é utilizado hoje em dia, e os redutores de água variavam na sua composição e pureza, o que provocava grande variação no desempenho. Além disso, a indústria de concreto Norte Americana, na época, começava a utilizar a cinza volante como adição no concreto, mesmo sem saber exatamente o potencial de qualidade e econômico que ele possuía (AÏTCIN, 1998).

Nesse contexto, o primeiro concreto de alta resistência foi desenvolvido. Os produtores desse novo material tinham que achar uma forma de difundir sua utilização, para isso, fizeram um acordo com alguns empreendedores para incluírem em suas construções um ou outro pilar utilizando o concreto de alta resistência. Gradativamente o material, que possuía uma resistência à compressão na ordem de 10 a 15 MPa acima da comumente utilizada, começou a ser empregado com mais frequência, uma vez que os construtores perceberam as vantagens obtidas com tal material. Entre elas a redução do custo da obra, o aumento da área útil e a diminuição das seções dos pilares (AÏTCIN, 1998).

Desde o início, a produção de concreto de alta resistência faz uso de aditivos químicos, primeiramente foram os redutores de água a base de lignossulfonatos, que passou por uma grande evolução e mudanças conceituais no que diz respeito a seus teores e aplicações. Em seguida, com o aumento do uso de aditivos superplastificantes que garantiam uma boa trabalhabilidade com relações

água/aglomerante cada vez mais reduzidas foi observado que além de maiores valores de resistência a compressão, o material mostrou uma maior durabilidade. O que resultou em uma gama mais ampla de especificações e um concreto de alto desempenho (AİTCIN, 1998).

Outro importante material que colaborou muito para o aumento da *performance* dos concretos de alto desempenho foi a sílica ativa, antes tido como um inconveniente para as indústrias de produção de silício e ferro silício. A primeira utilização da sílica ativa, segundo Aİtcin (1998), foi em 1952 por um pesquisador norueguês, mas começou a ser utilizada como material cimentício apenas no final da década de 70 na Escandinávia. O uso da sílica ativa viabilizou a elaboração de um concreto com resistência a compressão com valores acima de 100 MPa (MARTINS, 2005).

A sílica ativa começou a ser utilizada na América do Norte, e também em todo o mundo a partir de 1980. Por volta 1990 surgiram vários estudos específicos sobre o CAD em todo o mundo, com o intuito de facilitar a produção e utilizar o CAD em diversas obras de impacto internacional (AİTCIN, 1998).

No início, a única característica desejada era de que este concreto apresentasse uma alta resistência à compressão, mas nos dias atuais outras características são importantes na obtenção do CAD. Dentre elas a baixa porosidade, alta durabilidade, maior velocidade nas construções, diminuição na seção estrutural e soma-se a todas estas vantagens uma diminuição no custo final da obra. Apesar de todas as vantagens que o CAD oferece, ele necessita de um maior controle de qualidade e seleção mais cuidadosa dos materiais constituintes (MARTINS, 2005).

2.4 CONCRETO PÓS REATIVO (CPR)

O CPR (Concreto Pós Reativo) foi desenvolvido através de pesquisas realizadas por volta dos anos 90 na França e no Canadá. Esse novo material de alta tecnologia surgiu como uma alternativa ao CAD, ou até mesmo ao aço, para satisfazer as exigências do mercado civil e militar. O CPR é capaz de resistir a esforços de compressão em uma faixa de 200 a 800 MPa, mostrando-se muito superior ao seu precursor, o CAD, que resiste a esforços de até 120 MPa (VANDERLEI, 2004).

O CPR se caracteriza por ser um concreto formado basicamente de pós, com partículas de diâmetro máximo menor que 2 mm e por possuir uma baixa relação água/cimento, na ordem de 0,15. Os materiais que o constituem são basicamente cimento, pó de quartzo, areia de quartzo, sílica ativa, fibras de aço de pequenas dimensões, superplastificantes e água. A adição das fibras de aço garante ao material uma boa resistência à tração e à flexão, somadas a boa resistência à compressão já característica do material. Contudo, o desafio na produção desse tipo de concreto é a necessidade de alta precisão na dosagem e rígida análise na composição granulométrica dos pós (VANDERLEI, 2004; VANDERLEI; GIONGO, 2006).

A distribuição granulométrica é muito importante na composição do CPR, uma vez que ele é tido como um material de alta densidade. Para possibilitar essa densidade é necessário que as partículas maiores estejam envoltas pelas partículas da classe imediatamente abaixo, e assim sucessivamente, de modo que os espaços entre as partículas sejam preenchidos, dando origem ao chamado empacotamento de partículas (VANDERLEI; GIONGO, 2006).

De acordo com Vanderlei (2004), é necessário obedecer aos seguintes princípios na obtenção do CPR:

- aumento da homogeneidade pela eliminação dos agregados graúdos;
- aumento da densidade pela otimização da distribuição granulométrica dos grãos e/ou aplicação de pressão no preparo;
- melhor microestrutura utilizando tratamento térmico durante a cura;
- aumento da ductilidade pela incorporação de fibras de aço;
- realizar a mistura e a moldagem de tal modo a gastar o menor tempo possível entre as operações.

Ao aplicar os três primeiros princípios obtém-se uma matriz com alta resistência a compressão, mas que possui baixa ductilidade. Para contornar esse problema é adicionada a mistura fibras de aço, o que atribui uma resistência à tração a esta estrutura. A cura térmica e/ou de pressão ajuda a melhorar o desempenho, mas a necessidade de sua aplicação deve ser avaliada em cada caso (VANDERLEI, 2004).

2.5 ADERÊNCIA

Um dos mecanismos mais importantes para a existência das estruturas em concreto armado é a aderência entre a armadura e o concreto, pois para absorver os esforços solicitantes, é necessário que os materiais trabalhem conjuntamente. A aderência tem o papel de transferir os esforços entre a barra de aço e o concreto e ainda compatibilizar as deformações entre eles. Além disso, é responsável pela ancoragem da armadura no concreto e também impede o escorregamento dessa armadura nos segmentos entre fissuras, ajudando a limitar a sua abertura (TAVARES, 2012).

O conjunto aço-concreto apresenta as mesmas deformações até que a tensão limite do concreto é atingida. Após esse valor limite, o mecanismo responsável por impedir o deslocamento relativo entre os dois materiais é a aderência. Isto é o que caracteriza o concreto armado e o define como sendo um material estrutural (TAVARES, 2012).

O objetivo principal da associação entre o aço e o concreto é superar as deficiências que o concreto tem nas regiões de tração. Paralelamente, um concreto com boa qualidade e dimensionamento adequado da camada de cobertura fornece um meio alcalino que protege o aço contra corrosão. Ainda, segundo o autor, o "concreto armado é um material composto pela associação do concreto com barras de aço nele inseridas, de modo que constituam um sólido único, do ponto de vista mecânico, quando submetido às ações externas" (CLÍMACO, 2005).

A chamada "tensão de aderência" é conhecida através da análise do comportamento da aderência entre a barra da armadura e o concreto. Com isso, é possível avaliar a capacidade de carga das estruturas de concreto armado, controlar a fissuração das estruturas, definir as especificações do projeto de ancoragem e das emendas por transpasse nas estruturas (DUCATTI, 1993 *apud* VALE SILVA, 2010; FERNANDES, 2000).

A eficiência da ligação aço-concreto costuma ser quantificada através da relação tensão de aderência *versus* deslizamento, que expressa o deslizamento relativo esperado quando é aplicada uma determinada tensão na interface do aço com o concreto. Deslizamentos pequenos apontam danos locais ou acomodações dessa interface. Quando se incrementam, isto é, quando há um aumento do

deslizamento, indicam a destruição da aderência, o que causa deformações e fissurações. Alguns valores limites de deslizamentos são especificados por normas e procedimentos de projeto estrutural, sendo frequentemente associados a um determinado estado de deformação e fissuração inaceitável (CAETANO, 2008).

O deslizamento que ocorre no início do carregamento é causado em parte pela deformação elástica do concreto. No entanto, para cargas mais altas, ele é causado pelo esmagamento do concreto em frente às nervuras existentes nas barras nervuradas (FRANÇA, 2004).

As barras sem nervuras são classificadas como barras lisas, nelas a ruptura ocorre por arrancamento e a aderência resulta principalmente devido à adesão química entre a pasta de cimento e a barra. Quando a adesão química é rompida surge uma resistência aos deslizamentos devido ao atrito. Quando a resistência do atrito se esgota, o fendilhamento não é generalizado, mas a barra é arrancada do bloco de concreto deixando apenas um orifício quase intacto (FRANÇA, 2004).

O fenômeno da aderência tem natureza essencialmente diferente nas barras nervuradas, uma vez que as nervuras tem o intuito de conferir uma maior aderência no conjunto aço-concreto. Ainda que se desenvolvam nessas barras a adesão química e o atrito, a resistência ao deslizamento no concreto se deve essencialmente às pressões exercidas pelas nervuras. Isto é, nas barras nervuradas a aderência depende principalmente da ação mecânica entre o concreto e as nervuras. O efeito da adesão química é pequeno se comparado à ação mecânica e o atrito não ocorre até que haja escorregamento entre a barra e o concreto (FRANÇA, 2004).

Segundo Vieira (1994), a ocorrência da ruptura da aderência nas barras nervuradas se deve aos seguintes fatores:

- esmagamento do concreto junto aos flancos das nervuras;
- corte do concreto em torno da barra ou entre nervuras;
- fendilhamento longitudinal do concreto de recobrimento ao longo da barra;
- pela combinação destes três modos de ruptura.

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), que estabelece os requisitos básicos exigíveis para projeto de estrutura de concreto, a posição da barra durante a concretagem influencia na aderência. Considera-se em boa situação quanto à aderência os trechos das barras que estejam em uma das posições seguintes:

- com inclinação maior que 45° sobre a horizontal;
- horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal, desde que:
 - para elementos estruturais com $h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
 - para elementos estruturais com $h \geq 60$ cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima.

Os trechos das barras em outras posições, e quando do uso de formas deslizantes, devem ser considerados em má situação quanto à aderência. A figura 1 ilustra as condições citadas acima.

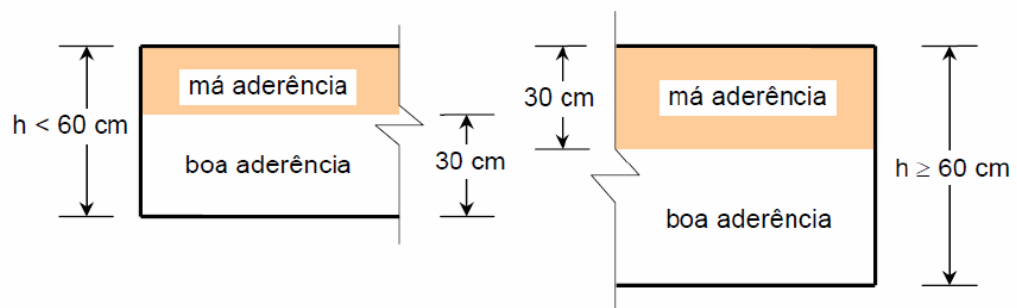


Figura 1 - Situações de boa e má aderência para armaduras horizontais

Fonte: OLIVEIRA (2011).

No concreto armado a armadura é chamada passiva, o que significa que as tensões e deformações nela existentes devem-se exclusivamente às ações externas aplicadas na peça (BASTOS, 2014).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a resistência à aderência de cálculo entre armadura e o concreto na ancoragem de armaduras passivas é obtida conforme a equação 1.

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (1)$$

Onde,

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c$$

f_{ctd} = Tensão de tração de cálculo

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

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

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

$\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência;

$\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência;

$\eta_3 = 1,0$ para $\varphi < 32$ mm;

$\eta_3 = (132 - \varphi)/100$, para $\varphi \geq 32$ mm.

Onde, φ é o diâmetro da barra, expresso em milímetros (mm).

Atualmente o estudo da ancoragem de barras solicitadas a tração se baseia, em maior parte, na realização de ensaios de arrancamento das barras de aço de blocos de concreto e modelagem numérica dos resultados. Que tem por objetivo verificar como responde uma barra isolada ao incremento de tensões de tração. O ensaio mais comum é o de arrancamento centrado, também conhecido como *pull-out-test* (CAETANO, 2008).

2.6 PULL-OUT TEST

Um dos ensaios mais conhecidos e tradicionais de aderência é o de arrancamento direto, o *pull-out test*, que é regulamentado pelo RILEM/CEB/FIP RC6 (1983) e pela ASTM C234 (1991). Este ensaio tem como propósito avaliar a resistência de ligação entre o concreto e a armadura (TAVARES *et al.*, 2014).

Os ensaios são caracterizados pelo uso de corpos-de-prova compostos apenas por uma barra de aço passante inserida em um bloco de concreto. O deslizamento, ou escorregamento, relativo entre a barra e o bloco de concreto é medido na extremidade livre da barra. Na outra extremidade é aplicada uma força de tração sobre o conjunto buscando extrair a barra do bloco (CAETANO, 2008).

A figura 2 ilustra o modelo do corpo de prova do RILEM/CEB/FIP RC6 (1983).

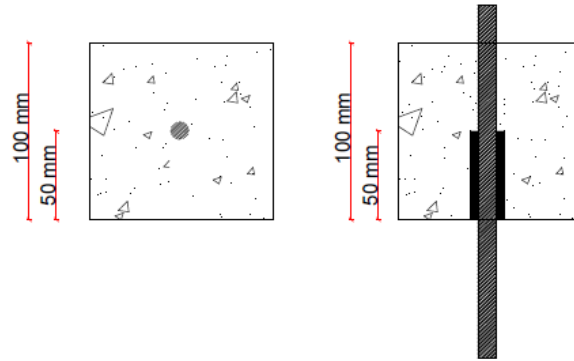


Figura 2 - Ensaio de arrancamento direto

Fonte: Autora, 2016.

O motivo pelo qual esse ensaio é um dos mais utilizados é a simplicidade de sua execução, que envolve corpos de prova de pequenas dimensões, o que facilita no manuseio e realização do ensaio. Em contrapartida o resultado do campo de tensões gerado no ensaio é diferente do que é gerado em estruturas reais, pelo fato de nos corpos de prova haver apenas uma barra de aço inserida no concreto. Já em estruturas reais, é utilizado um número maior de barras e também armadura transversal. Apesar de não conceder os valores reais da tensão de aderência, esse tipo de ensaio é uma excelente ferramenta para analisar comparativamente diferentes tipos de concreto, barras de aço e de cenário (CAETANO, 2008).

O ensaio de arrancamento simples passou por algumas modificações desde sua criação. Inicialmente, todo o comprimento de barra que atravessava o bloco tinha contato com o concreto, dessa forma, não se monitorava a ocorrência do deslizamento entre o aço e concreto. Posteriormente, foi adicionado na extremidade próxima ao carregamento um tubo plástico que impede o contato da barra com o concreto somente naquela parte, evitando que a barra seja afetada pelas tensões de compressão. Dessa forma, a ruptura acontece realmente pela falha da ligação entre o aço e o concreto. O modelo padrão de corpo-de-prova utilizado normalmente, foi estabelecido pela RILEM, e se caracteriza por um prisma quadrado, com arestas igual a dez vezes o diâmetro da barra (CAETANO, 2008).

Ainda que o modelo tradicional do experimento seja de um corpo de prova quadrado, Almeida Filho (2006) escolheu trabalhar com corpos de prova cilíndricos. Segundo ele, a forma cilíndrica fornece um cobrimento do concreto igual em todas as direções, fazendo com que a distribuição de tensões seja uniforme. De acordo com ele, a posição e a inclinação das barras durante a concretagem também influenciam significativamente a resistência de aderência, assim como a posição da concretagem, corpos de prova concretados na direção vertical possuem maior resistência de aderência do que os concretados na horizontal.

A resistência à compressão do concreto e o diâmetro da barra apresentam grande influência no resultado da resistência de aderência. Concretos com maior resistência a compressão possuem maior resistência de aderência, bem como menor diâmetro da barra de aço significa maior resistência à aderência (ALMEIDA FILHO, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista cumprir com os objetivos apresentados, foi realizado um ensaio de arrancamento direto, o *PULL-OUT-TEST (POT)*. Ele se caracteriza por um ensaio de tração onde é moldado o corpo de prova contendo uma barra de aço, neste caso a barra utilizada é nervurada. O presente trabalho utiliza de corpos de prova de forma cilíndrica, a fim de se obter uma distribuição uniforme de tensões. Diferentemente do regulamentado pela RILEM, que como já foi apresentado anteriormente, utiliza de corpos de prova prismáticos.

As formas dos corpos de prova foram confeccionadas com tubos de PVC de 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme o desenho esquemático da figura 3, cortadas com uma serra circular de bancada. Para fechar a extremidade inferior da forma colocou-se como base uma placa de compensado, de formato quadrado com 100 mm de lado, cortada com o auxílio de uma serra circular de bancada. No centro da base, fez-se um furo com diâmetro de 10 mm, mesma medida do diâmetro da barra, a fim de que a mesma atravessasse o furo e ficasse corretamente posicionada. Em seguida, o componente de PVC foi colado à base de compensado com uma cola adesiva instantânea universal, tomando o cuidado de que o furo estivesse corretamente centralizado.

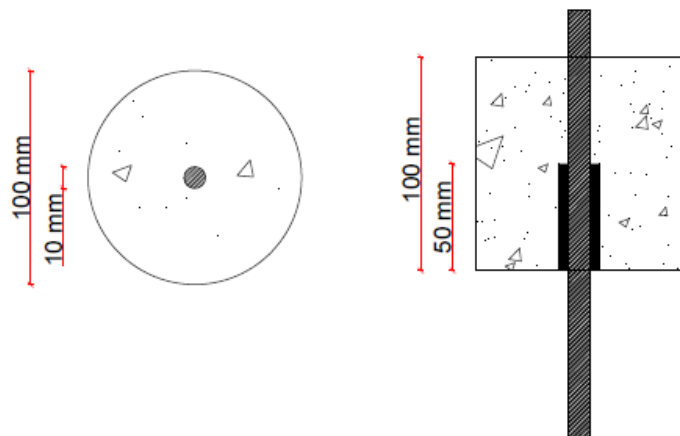


Figura 3 - Modelo esquemático do corpo de prova

Fonte: Autora, 2015.

O tubo de PVC teve de ser cortado na direção vertical para que fosse possível o desmolde, pois apenas a aplicação do desmoldante não era suficiente para que o concreto desgrudasse do molde. O corte foi feito com uma serra manual comum. Para que o concreto não vertesse pelo corte lateral da forma, foi aplicada uma cola PVA branca na abertura, apenas para vedá-la.

Na parte não aderente do corpo de prova foi colocada uma mangueira plástica comum, com altura de 50 mm, de diâmetro suficiente para que a barra de aço passasse por entre a mangueira. Na figura 4 abaixo é possível observar os moldes montados antes da concretagem.



Figura 4 - Moldes montados antes da concretagem

Fonte: Autora, 2016.

A barra de aço empregada era nervurada e tinha 10 mm de diâmetro, o correspondente a 1/10 do diâmetro do tubo de PVC do molde. Foram cortadas com aproximadamente 80 cm para possibilitar o seu encaixe no equipamento utilizado para a o ensaio. Para que fosse possível fazer o adensamento do concreto no molde, foi necessário usar um pedaço da mesma barra de aço do ensaio, pois, não foi possível a utilização do bastão de adensamento, já que o mesmo era demasiadamente grande com relação ao molde do ensaio. Na figura 5 estão ilustrados os corpos de prova já concretados.



Figura 5 - Corpo de prova concretados para ensaio de arrancamento

Fonte: Autora, 2016.

Para a realização dos ensaios de compressão foram utilizados os corpos de prova padrão regulamentados pela NBR 5738/2008, com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para os concretos: convencional, auto adensável e alto desempenho.

No concreto de pós reativos foi utilizado um corpo de prova menor, de dimensões 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, que é regulamentado para ensaio de compressão de pasta de cimento. Este concreto, excepcionalmente, foi executado na argamassadeira devido a sua composição de materiais finos e o seu rápido tempo de pega.

Ao todo foram moldados vinte corpos de prova para o ensaio de arrancamento, cinco para cada tipo de concreto analisado, e para o ensaio de compressão foram três para cada tipo de concreto, totalizando 12 corpos de prova. Depois de moldados, os corpos de prova do ensaio de compressão ficaram imersos em um tanque com água para cura, durante 28 dias, que é o tempo necessário para que ele atinja a resistência à compressão pretendida. Já os corpos de prova do ensaio de tração foram colocados na câmara úmida durante o mesmo tempo.

3.1 CÁLCULOS DOS TRAÇOS DOS CONCRETOS

Na tabela 1 abaixo estão listados os traços dos concretos que foram calculados para a realização deste trabalho. É importante salientar que, com exceção do concreto convencional, os concretos utilizados neste trabalho são de caráter experimental. Portanto, foi necessário fazer alguns ajustes no traço do concreto durante sua execução. Os traços apresentados na tabela já consideram todos os ajustes.

Tabela 1- Traços dos concretos

Concreto	Traços						
	Cimento CPV	Areia	Silica ativa	Pó de quartzo	Brita 1	Água	Superplastificante
Convencional	1	1,47	-	-	2,6	0,65	-
Auto adensável	1	2,11	0,53	-	1,11	0,45	1%
Alto desempenho	1	1,85	0,11	-	2,62	0,31	0,6%
Pós reativo	1	1,475	0,25	0,306	-	0,2	4%

Fonte: Autora, 2016.

3.2 ENSAIOS

Os ensaios de arrancamento foram realizados na máquina universal para ensaios DL30000 da marca EMIC, a configuração do ensaio pode ser visualizada na figura 6. O corpo de prova foi colocado na parte superior da prensa e a barra de aço passava por um furo que tem no suporte da máquina. A barra de aço foi presa à garra da prensa e então aplicada uma carga inicial para puxar a barra, imprimindo assim o esforço de tração na barra até o seu escorregamento e o posterior rompimento do concreto.

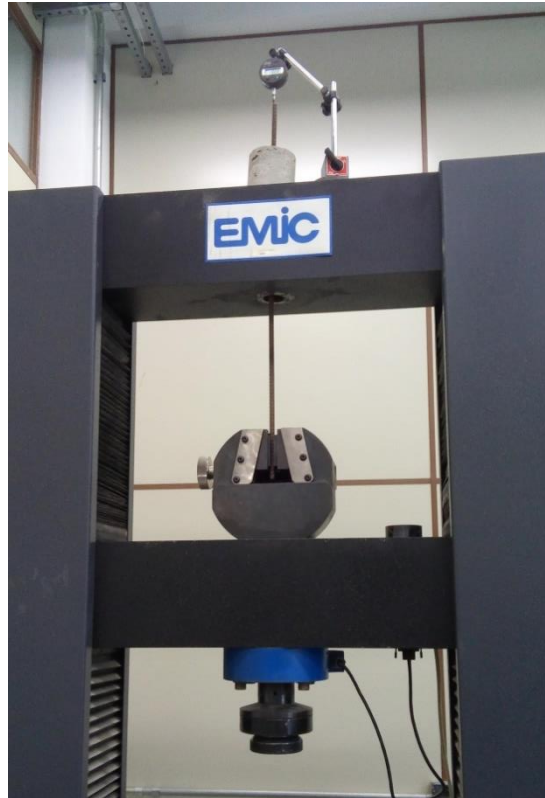


Figura 6 - Configuração do ensaio de arrancamento direto

Fonte: Autora, 2016.

A fim de comparar a influência da resistência à compressão com a resistência a aderência na tração, foi realizado também o ensaio de resistência à compressão, que é normatizado pela NBR 5739/2007. Para a realização do ensaio de compressão foi utilizada a prensa hidráulica digital DL200 da marca EMIC, conforme a figura 7.



Figura 7 - Configuração do ensaio de compressão axial

Fonte: Autora, 2016.

Do ensaio realizado conforme apresentado na figura 7 obtém-se o esforço de compressão ao qual o concreto resiste. Com esses resultados é possível aplicar a equação 9.3.2.1 da NBR 6118/2014 e compará-los com os obtidos pelo ensaio de arrancamento. No capítulo seguinte deste trabalho serão apresentados e discutidos os resultados obtidos conforme os experimentos realizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios de compressão e os ensaios de arrancamento, o *pull out test*, bem como a forma de ruptura dos corpos de prova.

4.1 VALIDADE DA EXPRESSÃO 9.3.2.1 DA NBR 6118/2014

Na tabela 2 estão os valores obtidos segundo o cálculo da tensão de aderência, expressão 9.3.2.1 da NBR 6118/2014.

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (1)$$

Tabela 2 - Tensão de aderência calculada pela expressão 9.3.2.1 da NBR 6118/2014

	Tensão de aderência calculada			
	CC	CAA	CAD	CPR
$f_{ck, médio}$ (MPa)	23,81	74,51	83,65	79,86
f_{ctm} (MPa)	2,48	4,70	4,92	4,84
$f_{ctk, inf}$ (MPa)	1,74	3,29	3,45	3,38
f_{ctd} (MPa)	1,24	2,35	2,46	2,42
η_1	2,25	2,25	2,25	2,25
η_2	1,00	1,00	1,00	1,00
η_3	1,00	1,00	1,00	1,00
f_{bd} (MPa)	2,80	5,30	5,54	5,45

Fonte: Autora, 2016.

Pela tabela 2, observa-se que a tensão de aderência tem como resultado valores maiores para os concretos que apresentam maior resistência à compressão característica. Ainda é possível constatar que o CPR possui resistência característica menor que a do CAD. Este resultado se deu pelo fato de não ter sido realizado a cura térmica do CPR, o que influencia diretamente em sua resistência à compressão.

Nas tabelas de 3 a 6 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento direto, realizados conforme apresentado no capítulo de procedimentos metodológicos, dos seguintes concretos: convencional, auto adensável, alto desempenho e pós reativo.

Tabela 3 - Tensão de aderência do ensaio de arrancamento direto para o concreto convencional

Tensão de aderência - Ensaio de arrancamento		
Concreto convencional - CP1	9,2	MPa
Concreto convencional - CP3	6,6	MPa
Concreto convencional - CP4	7,3	MPa
Concreto convencional - CP5	7	MPa
Média	7,5	MPa
Desvio padrão	1,0	MPa

Fonte: Autora, 2016.

Nota: Foi realizada a análise de dados expúrios e o CP2 foi retirado da amostra.

Tabela 4 - Tensão de aderência do ensaio de arrancamento direto para o concreto auto adensável

Tensão de aderência - Ensaio de arrancamento		
Concreto auto adensável - CP1	14,7	MPa
Concreto auto adensável - CP2	19,3	MPa
Concreto auto adensável - CP3	20,4	MPa
Concreto auto adensável - CP4	22,3	MPa
Concreto auto adensável - CP5	13,1	MPa
Média	18,0	MPa
Desvio padrão	3,5	MPa

Fonte: Autora, 2016.

Tabela 5 - Tensão de aderência do ensaio de arrancamento direto para o concreto alto desempenho

Tensão de aderência - Ensaio de arrancamento		
Concreto alto desempenho - CP1	32,0	MPa
Concreto alto desempenho - CP2	33,1	MPa
Concreto alto desempenho - CP3	31,4	MPa
Concreto alto desempenho - CP4	31,1	MPa
Concreto alto desempenho - CP5	32,4	MPa
Média	32,0	MPa
Desvio padrão	0,7	MPa

Fonte: Autora, 2016.

Tabela 6 - Tensão de aderência do ensaio de arrancamento direto para o concreto pós reativo

Tensão de aderência - Ensaio de arrancamento		
Concreto pós reativo - CP1	31,4	MPa
Concreto pós reativo - CP2	34,1	MPa
Concreto pós reativo - CP3	33,7	MPa
Concreto pós reativo - CP4	34,0	MPa
Concreto pós reativo - CP5	33,4	MPa
Média	33,3	MPa
Desvio padrão	1,0	MPa

Fonte: Autora, 2016.

Na tabela 7 estão os resultados obtidos pelo cálculo da tensão de aderência, os resultados médios do experimento e a diferença percentual entre eles.

Tabela 7 - Comparação dos resultados obtidos em ensaio com os resultados calculados pela equação

	Tensão de aderência			
	CC	CAA	CAD	CPR
Tensão de aderência calculada (MPa)	2,8	5,3	5,5	5,4
Tensão de aderência média do ensaio (MPa)	7,9	18,0	32,0	33,3
Diferença percentual	283%	339%	577%	612%

Fonte: Autora, 2016.

Observa-se que a resistência de aderência do ensaio apresenta valores superiores comparando-se aos calculados. Os valores retirados da tabela 2 se caracterizam por serem valores teóricos, além disso, a equação é constituída por coeficientes de segurança, que minoram os valores de resistência. Ou seja, a norma dá o mínimo valor de aderência que deve ser atendida entre o concreto e a armadura para que a estrutura resista.

Ao analisar as tabelas constata-se que as tensões nos concretos especiais são maiores que as do concreto convencional, resultado que já era esperado segundo a teoria deste trabalho. No caso do concreto pós reativo, o valor da resistência à compressão mais baixo do que o do concreto de alto desempenho pode ser explicado, como já foi dito anteriormente, pela falta da cura térmica. Apesar disso, a tensão de aderência do CPR mostra-se maior que a do CAD. Isso acontece porque o concreto pós reativo possui menor o número de vazios e há maior interação entre as partículas, o chamado empacotamento de partículas, característica que atua diretamente na aderência.

Nas tabelas de 8 a 11 estão apresentados os valores de tensão de escoamento e deformação específica dos corpos de prova analisados.

Tabela 8- Tensões na armadura - Concreto convencional

	Tensões na armadura		
	Força (N)	σ (MPa)	ϵ
Concreto convencional - CP1	14429,82	183,726174	0,0008833
Concreto convencional - CP3	10332,84	131,561805	0,0006325
Concreto convencional - CP4	11427,37	145,497794	0,0006995
Concreto convencional - CP5	10995,58	140,000073	0,0006731

Fonte: Autora, 2016.

Nota: Foi realizada a análise de dados expúrios e o CP2 foi retirado da amostra.

Tabela 9 - Tensões na armadura - Concreto auto adensável

Tensões na armadura			
	Força (N)	σ (MPa)	ϵ
Concreto auto adensável - CP1	23115,83	294,3199	0,001415
Concreto auto adensável - CP2	30265,47	385,3519	0,001853
Concreto auto adensável - CP3	31962,50	406,9592	0,001957
Concreto auto adensável - CP4	35075,41	446,594	0,002147
Concreto auto adensável - CP5	20635,55	262,74	0,001263

Fonte: Autora, 2016.

Tabela 10 - Tensões na armadura - Concreto de alto desempenho

Tensões na armadura			
	Força (N)	σ (MPa)	ϵ
Concreto alto desempenho - CP1	50238,27	639,65352	0,0030753
Concreto alto desempenho - CP2	52035,72	662,539364	0,0031853
Concreto alto desempenho - CP3	49284,31	627,507324	0,0030169
Concreto alto desempenho - CP4	48772,19	620,98681	0,0029855
Concreto alto desempenho - CP5	50941,18	648,603248	0,0031183

Fonte: Autora, 2016.

Tabela 11 - Tensões na armadura - Concreto pós reativo

Tensões na armadura			
	Força (N)	σ (MPa)	ϵ
Concreto pós reativo - CP1	49294,36	627,6353	0,003017
Concreto pós reativo - CP2	53562,05	681,9732	0,003279
Concreto pós reativo - CP3	52979,63	674,5576	0,003243
Concreto pós reativo - CP4	53381,30	679,6718	0,003268
Concreto pós reativo - CP5	52457,47	667,9093	0,003211

Fonte: Autora, 2016.

De acordo com as tabelas de 8 a 11, é possível observar que para o concreto convencional e o auto adensável prevalece à tensão de aderência do aço

com o concreto sobre a tensão da armadura. Já para os concretos de alto desempenho e pós reativo as tensões de aderência do concreto com o aço assumem valores de grande magnitude, e nesses casos pode ocorrer o escoamento do aço antes do escorregamento da armadura.

No apêndice A encontram-se os gráficos de tensão *versus* deformação de todos os concretos estudados neste trabalho.

4.2 RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA

Nas figuras 8 a 11 estão apresentados os corpos de prova após o ensaio de arrancamento direto. Nelas é possível observar a forma de ruptura dos corpos de prova. No concreto convencional mostrado na figura 8, a ruptura se deu por fendilhamento do concreto, todos as amostras romperam-se com 3 ou mais veios.



Figura 8 - Ruptura do corpo de prova de concreto convencional

Fonte: Autora, 2016.

Nas figuras 9 a 11 observa-se que o rompimento do concreto também se deu por fendilhamento do concreto. A diferença entre o concreto convencional e os demais é que no concreto convencional não houve o rompimento dos agregados graúdos, assim como houve com os concretos especiais.



Figura 9 - Ruptura do corpo de prova de concreto auto adensável

Fonte: Autora, 2016.



Figura 10 - Ruptura do corpo de prova de concreto alto desempenho

Fonte: Autora, 2016.



Figura 11 - Ruptura do corpo de prova de concreto pós reativo

Fonte: Autora, 2016.

Nas imagens observa-se que não houve escorregamento da barra e posterior esmagamento do concreto entre as nervuras da barra de aço. Com isso é possível constatar que ocorreu apenas a ruptura do concreto.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi analisar a influência que a resistência à compressão do concreto tem sobre a tensão de aderência no conjunto formado entre a armadura e o concreto. Para tanto, analisou-se a validade da expressão 9.3.2.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) para os concretos auto adensável, de alto desempenho e de pós reativos. A forma de ruptura dos corpos de prova e as tensões de aderência no conjunto entre o aço e o concreto, dadas pelo ensaio de arrancamento direto, também foram analisadas.

Com os resultados obtidos na tabela 2, que apresenta os cálculos da expressão 9.3.2.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), é possível concluir a sua validade para os concretos especiais analisados neste trabalho. A equação utiliza da resistência à compressão característica do concreto para fornecer os valores de tensão de aderência. O cálculo foi realizado com os valores médios obtidos do ensaio de resistência à compressão. Os resultados mostram que a equação é proporcional, ou seja, quanto maior a resistência à compressão, maior a aderência entre o aço e o concreto.

Os resultados obtidos a partir do ensaio de arrancamento direto atestam o que foi apresentado na teoria deste trabalho de que os concretos especiais CAA, CAD e CPR apresentam maior aderência com a armadura. O resultado do ensaio de arrancamento mostra os valores reais da resistência de aderência, e como visto nas tabelas de 3 a 6 são superiores aos valores calculados pela equação da norma.

A forma de ruptura dos corpos de prova, apresentados nas figuras de 8 a 11, deu-se por fendilhamento do concreto, em todos os tipos de concreto analisados. Esse tipo de ruptura é determinada pela resistência à tração do concreto e não pela aderência entre o conjunto aço-concreto. É possível observar pelas figuras de 8 a 11 que não houve escorregamento da barra de aço e nem esmagamento do concreto entre as ranhuras da barra. Observa-se ainda que nos concretos CAA, CAD E CPR houve ruptura do agregado graúdo, o que indica que a resistência da pasta de cimento era maior que a do agregado graúdo.

. A delimitação da dimensão do agregado graúdo, o uso de aditivos e as adições fazem com que a quantidade de vazios dentro da estrutura de concreto seja menor do que em concretos convencionais. O fato de os concretos especiais

analisados neste trabalho possuírem esta melhor seleção dos materiais empregados colabora tanto para uma melhor resistência à compressão quanto para tração. Conclui-se então, que a resistência à compressão do concreto possui influência na aderência do conjunto formado pelo concreto com a armadura.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência da resistência à compressão na aderência com a armadura em concretos com adição de fibras;
- Correlacionar o módulo de elasticidade dos concretos especiais com as tensões de ruptura obtidas no ensaio de arrancamento direto.

REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, Pierre-claude. **High-performance concrete**. Londres: e & Fn Spon, 1998.
- ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes de. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis**. 2006. 310 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Modelagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro: Abnt, 1994. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823**: Concreto auto-adensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. 1 ed. Rio de Janeiro, 2010. 15 p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 256 p.
- BASTOS, P. S. S. **Notas de aula: estruturas de concreto armado**. 2014. Engenharia Civil UNESP, Bauru, 2014. 92 p.
- CAETANO, Luciane Fonseca. **Estudo de comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- CARVALHO, José Dirceu Nogueira de. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**. [s.l.], p. 17-28. 2008.
- CASTRO, Clayton Moreira de. **CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO: ESTUDO DA ADERÊNCIA COM A ARMADURA SOB AÇÕES REPETIDAS**. 2002. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto armado**: fundamentos de projetos, dimensionamentos e verificação. Brasília: UnB, 2005. 410p.
- CONCRETO, Portal do. **Concreto armado**. Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/armados.html>>. Acesso em: 10 set. 2015.
- EFNARC **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Farnham - Uk, 2002. 32 p.
- FRANÇA, Valério Henrique. **Aderência Aço-Concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

LIBERATI, E. A. P.; LEONEL, E. D.; NOGUEIRA, C. G.. Influência da corrosão da armadura na capacidade resistente à flexão de vigas em concreto armado: uma abordagem via teoria da confiabilidade estrutural. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 7, n. 3, p.1-5, jun. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-41952014000300005&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 10 set. 2015.

LISBÔA, Edvaldo Monteiro. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

MARTINS, Israel Rodrigo de Freitas. **Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. Self-Compacting Concrete. **Journal Of Advanced Concrete Technology**. [s.l], p. 5-15. abr. 2003.

OLIVEIRA, Paulo Victor Silva de. **Estudo da aderência aço-concreto: Ensaio de tirantes**. 2011. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2011.

PALARETI, Roberta. **Concreto Autoadensável**. 2009. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2009.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e Construções**, São Paulo, v. 53, p.14-19, mar. 2009

REDIMIX. **Tipos de concreto**. Disponível em: <<http://www.redimix.com.br/tiposdeconcreto/>>. Acesso em: 10 set. 2015.

SILVA, Wanderley Geraldo da. **Avaliação de concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha cerâmica**. 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

TAVARES, Alysson José. **Aderência aço-concreto: Análise numérica dos ensaios Pull-out e Apulot**. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

TAVARES, A. J. et al. . Aderência aço-concreto: Análise numérica dos ensaios Pull-out e Apulot usando o programa ATENA. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l], v. 7, n. 1, p.138-157, fev. 2014.

VALE SILVA, Bruno do. **Investigação do potencial dos ensaios APULOT e pull-out para estimativa da resistência a compressão do concreto**. 2010. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

VANDERLEI, Romel Dias; GIONGO, José Samuel. Análise experimental do concreto de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**. São Carlos, p. 115-148. 2006.

VANDERLEI, Romel Dias. **Análise experimental do concreto de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VASCONCELOS, A.C. **O concreto no Brasil – Recordes, Realizações, História**. São Paulo, Ed. Pini, 2a ed., v.1, 1985, 277p.

VIEIRA, F.M.P.. **Estudo do Comportamento da Aderência das Barras de Aço no Concreto de Alta Resistência com Adição de Microssílica**. Porto Alegre 1994. 107p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE TENSÃO *VERSUS* DEFORMAÇÃO

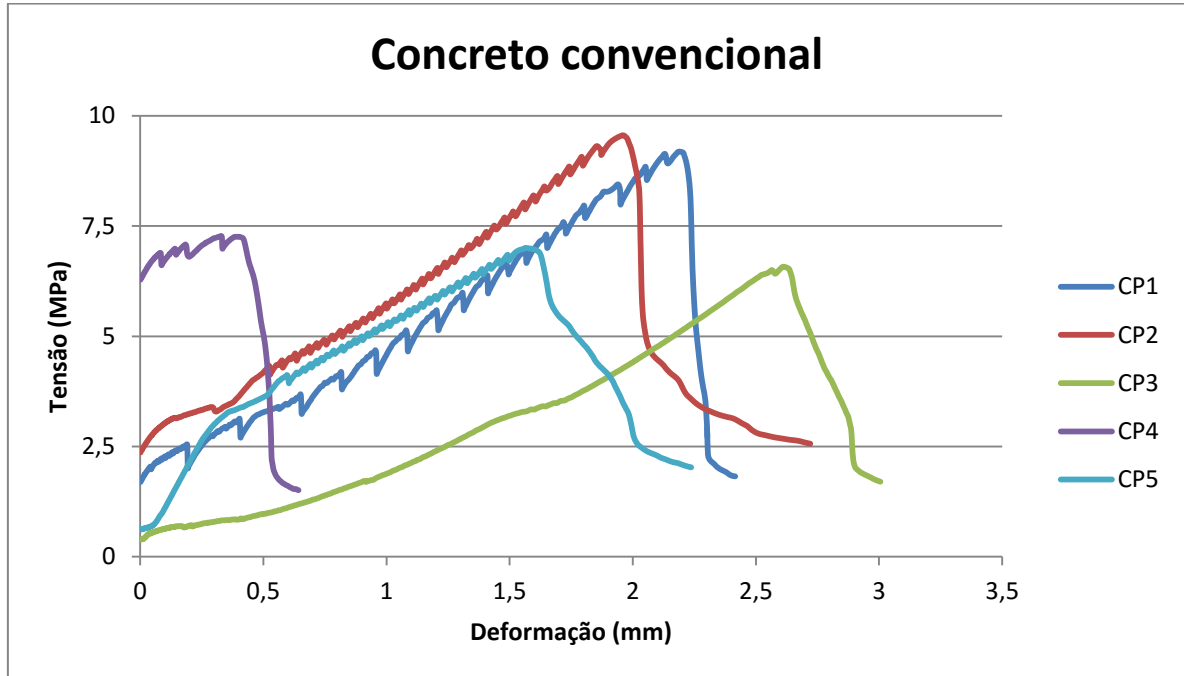


Gráfico 1 - Tensão *versus* deformação do concreto convencional

Fonte: Autora, 2016.

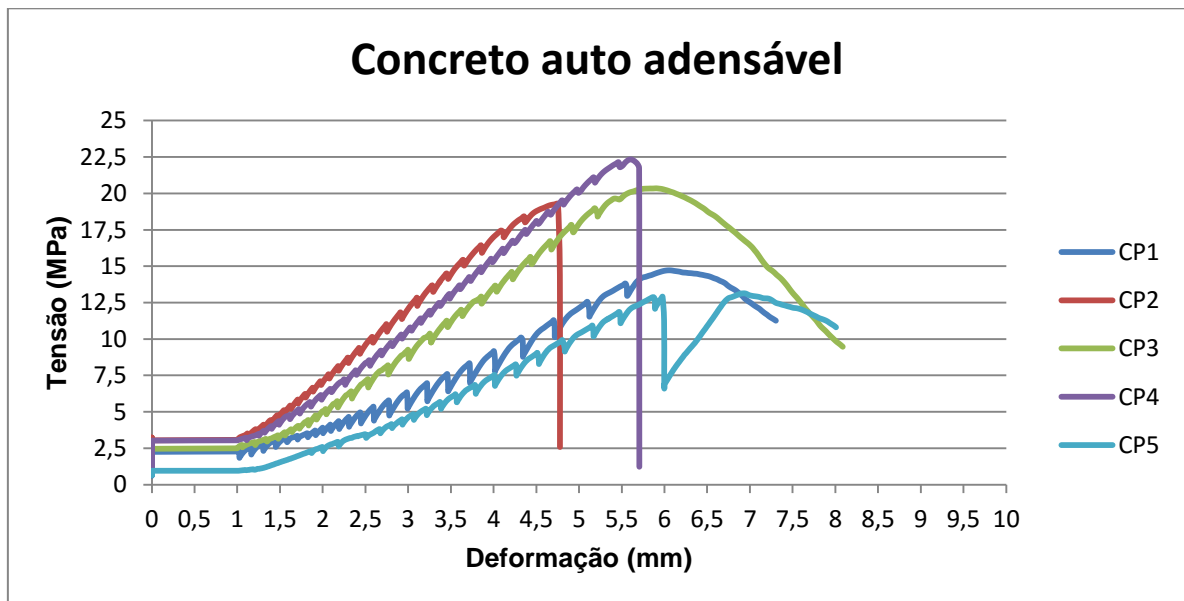


Gráfico 2 - Tensão *versus* deformação do concreto auto adensável

Fonte: Autora, 2016.

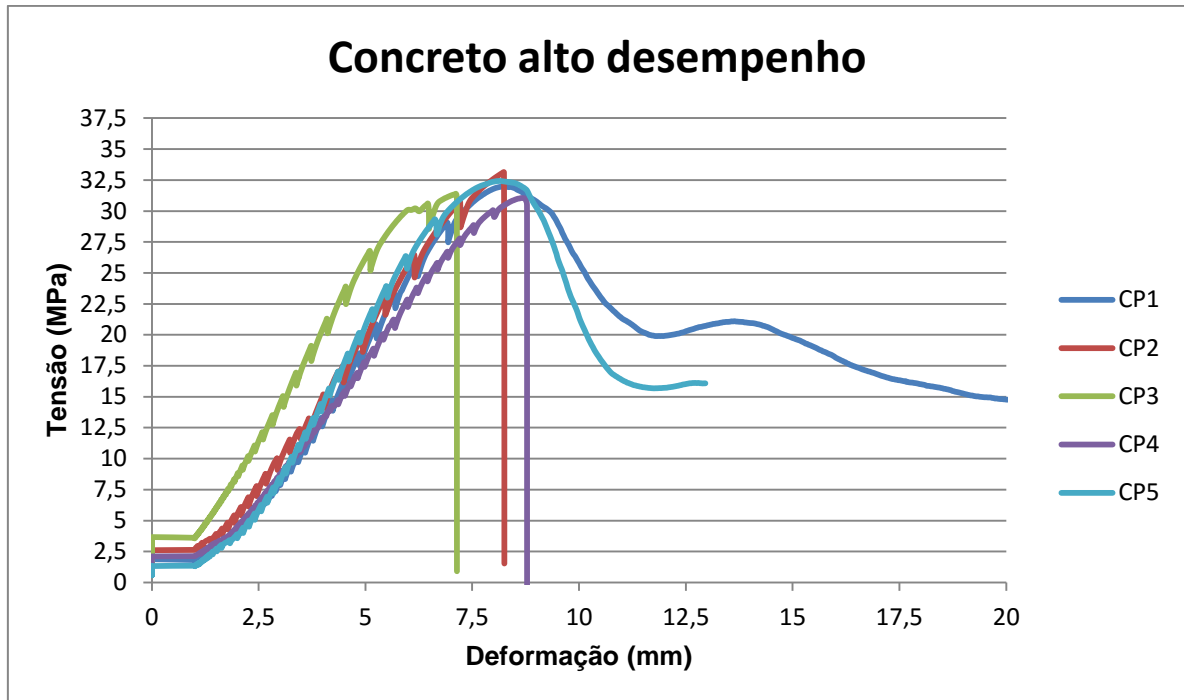


Gráfico 3 - Tensão *versus* deformação do concreto alto desempenho

Fonte: Autora, 2016.

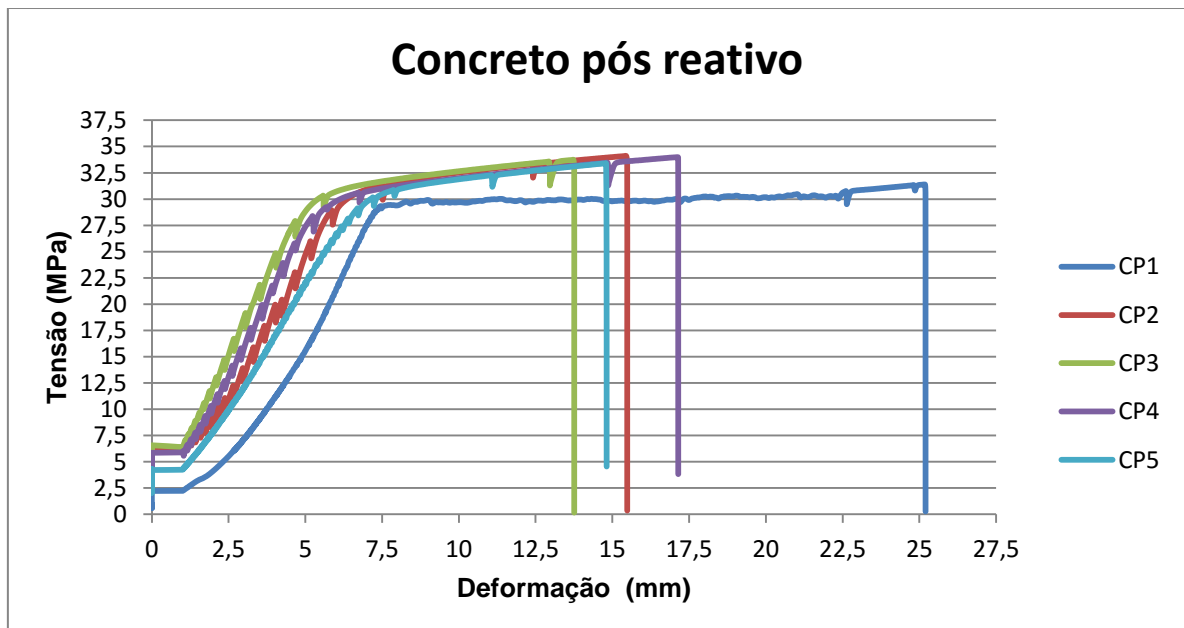


Gráfico 4 - Tensão *versus* deformação do concreto pós reativo

Fonte: Autora, 2016.

