

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

THAYNA CAROLINE CASAGRANDE

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO DE ADERÊNCIA AÇO-
CONCRETO PARA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

THAYNA CAROLINE CASAGRANDE

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO DE ADERÊNCIA AÇO-
CONCRETO PARA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco.

Orientadora: Profa. Dra. Caroline Angulski da Luz

Coorientador: Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho

PATO BRANCO

2014



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO DE ADERÊNCIA AÇO- CONCRETO PARA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO

THAYNA CAROLINE CASAGRANDE

Aos 30 dias do mês de julho do ano de 2014, às 8h15min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 29-TCC/2014.

Orientadora: Prof^a. Dr^a CAROLINE ANGULSKI DA LUZ (DACOC / UTFPR-PB)

Coorientador: Prof. Dr. JOSÉ ILO PEREIRA FILHO (DACOC / UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Dr. ROGÉRIO CARRAZEDO (DACOC / UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. GUSTAVO LACERDA DIAS (DACOC / UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

Ninguém faz nada sozinho. Todos os sonhos realizados e objetivos alcançados são frutos de parcerias com a vida que levamos, amigos que reconhecemos, autores que lemos, e conversas que tivemos. Assim quero agradecer:

Primeiramente a Deus, por guiar e iluminar todos os meus passos, não me deixando fraquejar nos momentos difíceis;

À minha família, por me permitir sonhar. Principalmente ao meu pai, exemplo de caráter e perseverança, minha mãe pelo apoio, paciência e carinho sempre dedicados e meu irmão, que apesar de não acompanhar fisicamente esta trajetória, jamais me abandonastes;

A todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica, em especial aos professores Dra. Caroline Angulski da Luz e Dr. José Ilo Pereira Filho pela orientação e dedicação na elaboração deste trabalho, aos professores Dr. Rogério Carrazedo e Dr. Gustavo Lacerda Dias por aceitarem ler e contribuir com o estudo;

Às minhas amigas da vida: Kenselyn de Andrade, Indianara Cristina Steffens e Aline Bach pela irmandade construída ao decorrer de longos anos, e por compreenderem minha falta nos momentos de ausência;

A todos os meus colegas, especialmente Maxwell Varela pela ajuda nas tardes de laboratório, Jéssica Amanda Hasse pela bela amizade que a graduação nos presenteou e ajuda incessante na elaboração dessa pesquisa. E ainda, à Thaís Gasperin que além da amizade sincera e verdadeira de incontáveis anos, foi colega durante todo esse caminho;

Ao Eulino Silveira pela amizade, companheirismo e ajuda primordial para que esse trabalho pudesse ser desenvolvido.

A vocês e a todas as outras pessoas que aqui não foram citadas, mas se fizeram presentes: muito obrigada.

“A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu
tamanho original”

Albert Einstein

RESUMO

CASAGRANDE, Thayna C. **Avaliação da eficiência do ensaio de aderência aço-concreto para estimativa da resistência à compressão axial do concreto.** 2014. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

No setor da construção civil o controle de qualidade dos produtos e serviços é feito por meio de fiscalização de trabalhos e realização de ensaios que exigem, na maioria das vezes, equipamentos modernos e profissionais qualificados, sendo o método mais comum o ensaio de resistência à compressão do concreto, uma vez que este é um dos parâmetros mais importantes do projeto estrutural. Porém, ao realizar este tipo de controle de qualidade, é desprezada a premissa básica da existência do concreto armado: aderência entre o concreto e a armadura de aço. Para avaliação da aderência existem diversos tipos de testes, sendo mais comum o de arrancamento. Após estudos, concluiu-se que a resistência à compressão do concreto é fator determinante para a aderência entre os materiais. A partir disso o ensaio de arrancamento foi adaptado, de modo que o ensaio é realizado utilizando-se de equipamentos simples e de baixo custo e ainda, permite que o controle do concreto seja realizado no próprio canteiro de obras. Diante disso, esse trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar a eficiência para estimativa da resistência do concreto através da tensão de aderência obtida por meio do ensaio, quando o mesmo é executado com diferentes diâmetros e comprimentos de aderência, visando relacionar a resistência com os comprimentos. Foi observado que para concretos de mesma classe, à medida que o comprimento de aderência aumenta a resistência à compressão estimada decresce, mas que os resultados apresentam bastante proximidade com os valores obtidos através de método tradicional. Sendo assim, o método pode ser adotado para realização do controle do concreto, desde que sejam determinadas e avaliadas, previamente, a classe do concreto e o comprimento de aderência.

Palavras-chave: Aderência. Comprimento de aderência. Ensaio Apulot. Resistência à compressão. Controle de qualidade do concreto.

ABSTRACT

CASAGRANDE, Thayna C. **Evaluation of efficiency of the test of adherence steel-concrete to estimate the compressive strength of concrete.** 2014. 66 sheets. Bachelor thesis(Bachelor Degree of Civil Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

In the construction sector the quality control of products and services is done through supervision of works and testing of materials that require, in most cases, modern equipment and qualified professionals, where the most common method is the compressive strength the concrete, because this is one of the most important parameters of the structural design. However, in the performing this type of quality control, is despised the basic premise of the existence of reinforced concrete: adhesion between the concrete and the steel. To evaluate adherence there are several types of tests, and the most common is the pull out. After various studies, it was found that compressive strength of the concrete is essential factor for the adhesion between the materials. From this it was proposed a adaption of pull out test, called Apulot, which is performed using simple equipment, cheap and also, allows control of concrete is carried out on the construction site. Therefore, this study aimed develops and evaluate efficiency to estimate the strength of concrete through the adhesion stress obtained by the test, when it is executed with different diameters and lengths of adhesion, to relate resistance with the lengths. It was observed that for the same class of concrete, measurement the length increases, the estimated strength compression decreases, but the results have very proximity to the real values. Thus, the method can be used to perform the control of the concrete, since concrete class and the length of adhesion are determined an evaluated previously.

Keywords: Adherence. Lengths of adherence. Apulot Test. Strength of compression. Quality control of concrete.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Aderência por adesão..... | 16 |
| Figura 2 – Aderência por atrito..... | 17 |
| Figura 3 – Aderência mecânica | 18 |
| Figura 4 – Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais, devido à segregação e acumulação de água..... | 20 |
| Figura 5 – Situações de boa e má aderência para armaduras horizontais..... | 20 |
| Figura 6 – Modelo Teórico da Curva de Aderência | 22 |
| Figura 7 – Tensões principais no ensaio de arrancamento (<i>pull-out test</i>) | 24 |
| Figura 8 – Curva de ensaio de arrancamento direto | 24 |
| Figura 9 – Esquema de ensaio Apulot | 26 |
| Figura 10 – Ensaio de arrancamento Apulot | 26 |
| Figura 11 – Curva de correlação entre a tensão última de aderência e resistência à compressão obtida a partir do ensaio Apulot | 27 |
| Figura 12 – Tensão última de aderência para resistência à compressão de 25 MPa | 30 |
| Figura 13 – Esquema do molde dos corpos de prova destinados ao ensaio Apulot..... | 33 |
| Figura 14 - Delimitação do comprimento de Aderência | 33 |
| Figura 15 – Molde de garrafa PET | 34 |
| Figura 16 – Concretagem dos moldes para ensaio Apulot | 35 |
| Figura 17 - Esquema do dispositivo elaborado para o ensaio | 36 |
| Figura 18 – Dispositivo elaborado para execução do ensaio Apulot | 36 |
| Figura 19 – Fluxograma de pesquisa..... | 37 |
| Figura 21 – Arrancamento da barra de aço pelo fenômeno de deslizamento..... | 47 |
| Figura 22 – Região fissurada do concreto em decorrência da transferência de esforços por aderência..... | 47 |
| Figura 23 – Fendilhamento do concreto em virtude dos esforços de tração transversais | 48 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Evolução da resistência à compressão – 1ª Moldagem | 39 |
| Gráfico 2 – Evolução da resistência à compressão axial média | 40 |
| Gráfico 3 - Tensão <i>versus</i> deslizamento - Comprimento de aderência 4,1Ø - Barra de 12,5 mm | 42 |
| Gráfico 4 - Tensão <i>versus</i> deslizamento - Comprimento de aderência 6,3Ø - Barra de 10,0 mm | 42 |
| Gráfico 5 - Tensão <i>versus</i> deslizamento - Comprimento de aderência de 8,1Ø - Barra de 12,5 mm | 43 |
| Gráfico 6 - Tensão <i>versus</i> deslizamento - Comprimento de aderência de 12,6Ø - Barra de 10,0 mm | 43 |
| Gráfico 7 - Confronto entre valores obtidos e curva de correlação encontrada por Lorrain – 1ª Moldagem | 44 |
| Gráfico 8 - Confronto entre valores obtidos e curva de correlação encontrada por Lorrain – 2ª Moldagem | 45 |
| Gráfico 9 - Resistência à compressão estimada <i>versus</i> comprimento de aderência | 45 |
| Gráfico 10 - Comparativo de curvas tensão <i>versus</i> deslizamento de diferentes comprimentos de aderência | 46 |
| | |
| Gráfico C. 1 – Resistência à Compressão Estimada Através do Ensaio Apulot | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Comprimentos de Aderência | 31 |
| Tabela 2 – Traço do Concreto | 31 |
| Tabela 3 – Tempo de Mistura do Concreto | 32 |
| Tabela 4 - Resistência à compressão axial média – 1ª Moldagem | 38 |
| Tabela 5 – Resistência à compressão axial média | 40 |
| Tabela 6 - Resistência à compressão estimada através do ensaio Apulot – 1ª Moldagem..... | 41 |
| Tabela 7 – Resistência à compressão estimada através do ensaio Apulot – 2ª Moldagem | 42 |
| | |
| Tabela A. 1– Análise granulométrica areia natural | 55 |
| Tabela A. 2 – Massa unitária areia natural | 56 |
| Tabela A. 3 – Massa unitária brita..... | 56 |
| Tabela A. 4 – Massa específica agregado graúdo | 56 |
| Tabela A. 5 – Massa específica agregado miúdo | 56 |
| Tabela A. 6 – Massa específica do cimento | 57 |
| | |
| Tabela B. 1 - Resistência à compressão axial – 1ª Moldagem | 59 |
| Tabela B. 2 – Resistência à compressão axial – 2ª Moldagem..... | 59 |
| | |
| Tabela C. 1 – Resultados dos ensaios Apulots – 1ª Moldagem..... | 61 |
| Tabela C. 2 - Resultados dos ensaios Apulots – 2ª Moldagem | 61 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|------|--|
| ABCP | Associação Brasileira de Cimento Portland; |
| ACI | <i>American Concrete Institute;</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials;</i> |
| CA | Concreto Armado; |
| CP | Corpo de Prova; |
| CC | Concreto Convencional; |
| NBR | Norma Brasileira; |
| NM | Norma Mercosul; |
| PVC | Policloreto de Vinila |

LISTA DE ACRÔNIMOS

| | |
|---------|---|
| Apulot | <i>Appropriate Pull-Out Test;</i> |
| CAD | Concreto de Auto Desempenho; |
| CEB | <i>Comité Euro-International du Béton;</i> |
| IBRACON | Instituto Brasileiro do Concreto; |
| PET | Politereftalato de Etileno; |
| RILEM | <i>Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|------------------------------|
| τ_u | Tensão Última de Aderência; |
| F | Força; |
| ϕ | Diâmetro da Barra de Aço; |
| L | Comprimento de Aderência; |
| F_y | Tensão de Escoamento do Aço; |
| R | Raio da Barra de Aço |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. OBJETIVOS | 12 |
| 1.1.1. Objetivo Geral | 12 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos | 12 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA..... | 12 |
| 2. QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL | 14 |
| 3. ADERÊNCIA ENTRE AÇO E CONCRETO | 15 |
| 3.1. TIPOS DE ADERÊNCIA | 16 |
| 3.1.1. Aderência por Adesão..... | 16 |
| 3.1.2. Aderência por Atrito | 17 |
| 3.1.3. Aderência Mecânica | 17 |
| 3.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA ADERÊNCIA | 18 |
| 3.2.1. Adensamento | 18 |
| 3.2.2. Resistência Mecânica do Concreto | 19 |
| 3.2.3. Características Geométricas das Barras | 19 |
| 3.2.4. Posição das Barras na Concretagem | 19 |
| 3.2.5. Composição/Qualidade do Concreto | 21 |
| 3.2.6. Idade de Carga | 21 |
| 3.3. COMPORTAMENTO DE ADERÊNCIA | 21 |
| 3.4. ENSAIOS DE ADERÊNCIA | 23 |
| 3.4.1. Ensaio de Arrancamento Direto (<i>Pull-Out Test</i>) | 23 |
| 3.4.2. Ensaio de Arrancamento Direto Modificado (<i>Appropriate Pull-Out Test</i>)..... | 25 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 28 |
| 4.1. MATERIAIS | 28 |
| 4.1.1. Concreto..... | 28 |
| 4.1.1.1. Tipo de Cimento..... | 28 |
| 4.1.1.2. Agregado Miúdo | 28 |
| 4.1.1.3. Agregado Graúdo | 28 |
| 4.1.1.4. Aditivo..... | 29 |
| 4.1.2. Aço..... | 29 |
| 4.1.3. Moldes para Corpos de Prova do Ensaio Apulot..... | 29 |
| 4.2. MÉTODOS | 29 |
| 4.2.1. Determinação dos Parâmetros | 29 |
| 4.2.2. Determinação dos Comprimentos de Aderência | 30 |
| 4.2.3. Dosagem e Preparo do Concreto | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.4. Ensaio de Resistência à Compressão Axial | 32 |
| 4.2.5. Ensaio de Arrancamento Direto Modificado (Apulot) | 33 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 38 |
| 5.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL | 38 |
| 5.1.1. Primeira Moldagem | 38 |
| 5.1.2. Segunda Moldagem | 39 |
| 5.2. APULOT | 41 |
| 5.2.1. Primeira Moldagem | 41 |
| 5.2.2. Segunda Moldagem | 41 |
| 5.3. DISCUSSÕES..... | 44 |
| 5.3.1. Análise Visual dos Corpos de Prova Ensaados | 46 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 49 |
| REFERÊNCIAS | 51 |
| APÊNDICE A | 54 |
| APÊNDICE B..... | 58 |
| APÊNDICE C | 60 |

1. INTRODUÇÃO

O controle de qualidade dos materiais da construção civil é essencial para que se consiga aumentar a produtividade e a competitividade, reduzindo os custos de construção. Ao realizar controle de qualidade, são verificados fatores que são fundamentais para evitar patologias, como durabilidade, resistência e estabilidade estrutural (BARBOSA *et al*, 2013).

Em obras confeccionadas em concreto armado, onde a força suportada pela estrutura está diretamente relacionada à resistência à compressão do concreto, um dos ensaios mais conhecidos e utilizados para realização do controle de qualidade é o ensaio de compressão axial de corpos de prova de concreto. Porém, esse e a maioria dos testes apresentam elevado custo, pois necessitam de equipamentos tecnológicos e profissionais treinados. Deste modo, a maioria das obras, bem como empresas de médio e pequeno porte deixa de realizá-los, e acaba apresentando diversas patologias (GASPARETO *et al*, 2013).

Dentre outras, a principal desvantagem do ensaio de compressão axial é que este analisa somente o comportamento do material concreto, deixando de lado a avaliação do conjunto aço-concreto. Segundo Fusco (1976), para que o aço e o concreto trabalhem solidariamente deve existir aderência entre eles, assim evitando que haja escorregamento relativo entre os materiais.

De acordo com Ducatti (1993), a aderência é fator indispensável para realização de cálculo de ancoragem e emenda por transpasse nas barras de aço, cálculo das deflexões e para o controle de fissuração, ou seja, a quantidade mínima de armadura. O método mais utilizado para avaliar a aderência é o ensaio de arrancamento direto, chamado *Pull-Out-Test*, o qual é normalizado pela CEB/FIP RC6:1983. Recentemente este ensaio foi adaptado ao canteiro de obras com a finalidade de estimar a resistência à compressão do concreto. Esta adaptação, nomeada Apulot, tem como vantagem a facilidade de execução, e a possibilidade de aferir a resistência e o comportamento de aderência do concreto (SILVA *et al*, 2013).

Diante do exposto, tem-se a problemática do controle de resistência do concreto em obras, assim é válido avaliar o ensaio modificado (Apulot) para controle de qualidade de concreto armado, o qual se utiliza da aderência entre armadura de aço e concreto para relacionar com a resistência à compressão e posteriormente possa vir a ser realizado em canteiro de obras através de equipamentos simplificados.

No presente trabalho inicialmente foi feito levantamento bibliográfico a respeito do fenômeno e ensaios de aderência, posteriormente desenvolveu-se um dispositivo para

realização dos testes na máquina universal de ensaios, uma vez que se objetivava avaliar a eficiência do método, em seguida foram realizados os ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto e o ensaio Apulot, e por fim, foi observada a relação existente entre resistência à compressão (obtida por meio da tensão de aderência proveniente do ensaio Apulot) e comprimento de aderência.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo realizar o teste *Appropriate Pull-Out Test* - Apulot em laboratório visando posterior aplicação em canteiros de obras, com a finalidade de controlar a resistência à compressão do concreto.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver dispositivo para estudo em laboratório;
- Identificar as dificuldades da realização e implementação do teste;
- Verificar a influência do comprimento de aderência na estimativa da resistência à compressão.

1.2. JUSTIFICATIVA

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo todo. Segundo dados do IBRACON divulgados em 2013 pela Camargo Corrêa, o concreto só não é mais consumido que a água. Em 2012 foram consumidos 7 bilhões de m³ de concreto no mundo todo, sendo 44 milhões de m³ dosados em centrais no Brasil (CAMARGO CORRÊA, 2013).

Essa ampla utilização se deve principalmente a capacidade de se moldar a diversas formas projetadas quando se encontra no estado fresco e a semelhança com a resistência de rochas naturais, quando no estado endurecido. Além disso, o concreto apresenta elevada disponibilidade de seus elementos constituintes e a custos relativamente baixos.

A resistência à tração do concreto é muito baixa se comparada à resistência à compressão. Devido a este fato, para emprego estrutural, devem-se utilizar armaduras de aço, dando origem ao concreto armado. Essa união de materiais apresenta excelentes características devido à forte ligação por aderência entre o concreto e o aço e também pelo fato de ambos os materiais apresentarem coeficientes de dilatação térmica semelhantes, fazendo com que a ligação entre eles seja forte.

O controle de qualidade mais utilizado para o concreto armado é o ensaio de ruptura à compressão de corpos-de-prova de concreto, moldados no ato de lançamento do concreto nas formas, normatizado pela NBR 5739, denominado “Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos de Concreto” (ABNT, 2007). Ao realizar este ensaio, obtêm-se valores de resistência à compressão simples do concreto, e utilizando-se de correlações, é possível estimar valores de outros parâmetros, tais como resistência à tração, módulo de elasticidade, resistência ao cisalhamento, aderência, etc. Para realização deste, necessita-se de equipamentos apropriados, os quais são encontrados, na maioria das vezes, somente em laboratórios especializados. Além disso, ao se realizar este teste somente um dos materiais constituintes do concreto armado é avaliado, sendo que nas estruturas de concreto armado, o aço e o concreto trabalham solidariamente. Assim, é ignorada a aderência entre aço e concreto, sendo que esta é uma condição fundamental para que as estruturas apresentem bom funcionamento.

De modo a facilitar o controle de qualidade de peças de concreto armado, principalmente em obras de pequeno e médio porte para diminuir as inúmeras patologias que vêm ocorrendo, foi realizada a avaliação da eficácia do ensaio Apulot, o qual relaciona aderência entre os constituintes do concreto armado e a resistência à compressão do concreto. Esse ensaio pode ser executado utilizando-se de equipamento simplificado (macaco hidráulico), e realizado no canteiro de obras, dispensando o envio de corpos-de-prova para laboratórios e assim, viabilizando o controle do material, independente da localização e porte da obra e construtora.

2. QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Brandão (1998) define qualidade de um produto como a capacidade de atender a certas necessidades nas condições de uso previamente determinadas. Com a finalidade de garantir que o produto final atenda aos requisitos e especificações pré-estabelecidos, realiza-se o controle de qualidade através de atividades vinculadas a um conjunto de técnicas operacionais tanto para monitorar um processo, como para eliminar causas de desempenho insatisfatório.

Na indústria da construção civil, tradicionalmente, se faz o controle de qualidade por meio de fiscalização de trabalhos e realização de ensaios. Porém, atualmente, controle de qualidade remete-se a algo muito mais complexo e elaborado, englobando todo o processo construtivo e comprometendo todos os membros envolvidos, tais como projetistas, fornecedores, construtores e usuários (BRANDÃO E PINHEIRO, 1999).

No Brasil, a ABNT é quem norteia o controle de qualidade de produtos da construção civil, através de normas que contêm diretrizes e bases para execução de obras, projetos, fiscalização e ensaios. Um dos ensaios mais utilizados para controle de qualidade em obras executadas em concreto armado é o ensaio de compressão axial, o qual é regido pela NBR 5739 e através do qual se obtém o valor da resistência à compressão axial do concreto, principal parâmetro de projeto e controle estrutural em obras de concreto armado (SILVA *et al*, 2013).

3. ADERÊNCIA ENTRE AÇO E CONCRETO

Fusco (1976) define concreto armado como um material de construção formado por concreto e armadura de aço, onde ambos resistem solidariamente aos esforços a que forem submetidos (a armadura tem a finalidade de absorver passivamente aos esforços de tração, porém também pode ser utilizada para receber esforços de compressão, como no caso de pilares). O que caracteriza o material é a solidariedade entre concreto e armadura e essa solidariedade é garantida pela existência da aderência, impedindo o escorregamento relativo entre os constituintes.

A aderência (ou tensão de aderência) é definida como o mecanismo de transferência de tensões que existe na interface entre a barra de aço e concreto que a envolve. Vem sendo muito estudada, uma vez que seu conhecimento é a premissa básica para a compreensão do comportamento de ancoragens retas, ganchos e emendas, sendo que essas ancoragens são utilizadas para transferir os esforços da armadura para o elemento estrutural adjacente (FERNANDES, 2000).

Segundo Leonhardt & Mönning (1977) a aderência garante que a armadura, como um todo (a nível global), apresente um alongamento (deformação) igual ao das fibras vizinhas de concreto. Como o alongamento à tração do concreto é pequeno, o concreto fissa (consequentemente, ocorre deslocamentos relativos entre a armadura e o concreto) quando submetido a maiores solicitações de tração, e então, as barras de aço devem absorver estas solicitações. Sendo assim, a aderência deve desenvolver-se de modo que a abertura de fissuras permaneça pequena, ou seja, a aderência é responsável pelo controle de abertura de fissuras (quanto maior a aderência, maior a possibilidade de obter um maior número de fissuras, porém, com menor abertura individual, melhorando a proteção da armadura).

A avaliação da aderência se faz pela relação entre tensão de cisalhamento no concreto circunvizinho à armadura e deslocamento relativo entre ambos os materiais, provocado pela diferença de deformações específicas de cada um (FRANÇA, 2004).

3.1. TIPOS DE ADERÊNCIA

A aderência entre aço e concreto pode ser separada em três parcelas, aderência por adesão, por atrito e mecânica, as quais são explanadas a seguir.

3.1.1. Aderência por Adesão

Essa parcela de aderência surge através das ligações físico-químicas que existem entre o concreto e o aço, enquanto ocorrem as reações de pega do cimento. As reações de pega criam uma resistência de adesão (ação de colagem), a qual se opõe à separação dos dois materiais constituintes. A rugosidade e a limpeza da superfície da barra de aço afetam diretamente a resistência de adesão (FUSCO, 1995; LEONHARDT & MÖNNING, 1977).

Fusco (1995) afirma que esse tipo de aderência não é suficiente para evitar o escorregamento entre os materiais, pois pode ser destruída com pequenos deslocamentos, e é constatada pela resistência à separação dos materiais quando se tenta separar um bloco de concreto diretamente em contato com uma placa de aço, conforme ilustra a figura 1.

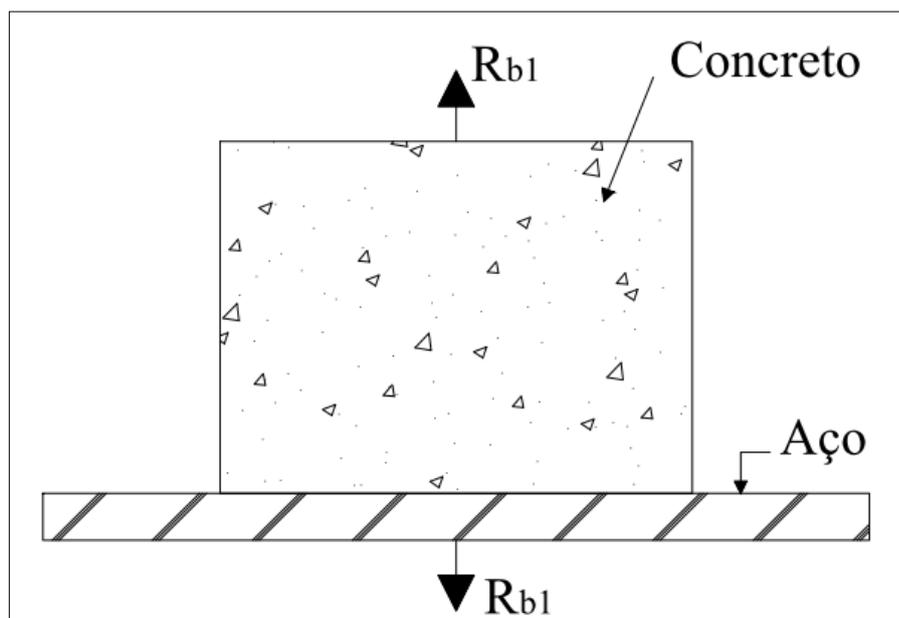


Figura 1 - Aderência por adesão
Fonte: Fusco (1995)

3.1.2. Aderência por Atrito

Ocorre devido a uma força de atrito existente entre os materiais, que depende do coeficiente de atrito entre aço e concreto, o qual é função da rugosidade superficial da barra de aço.

Decorre de pressões transversais às armaduras que são causadas por tensões de compressão transversais devidas às cargas de retração (variação de volume) do concreto, pois a barra inibe parcialmente as deformações de retração do concreto, e então surge a pressão transversal que provoca o acréscimo de aderência (LEONHARDT & MÖNNING, 1977).

No caso de barras curvas solicitadas à tração, surgem elevadas pressões de contato, onde o atrito pode ser intenso, e assim favorece a solidarização dos componentes. Do mesmo modo, compressão transversal externa aumenta capacidade de aderência por atrito (FUSCO, 1995). O fenômeno da parcela por atrito é exibido na figura 2.

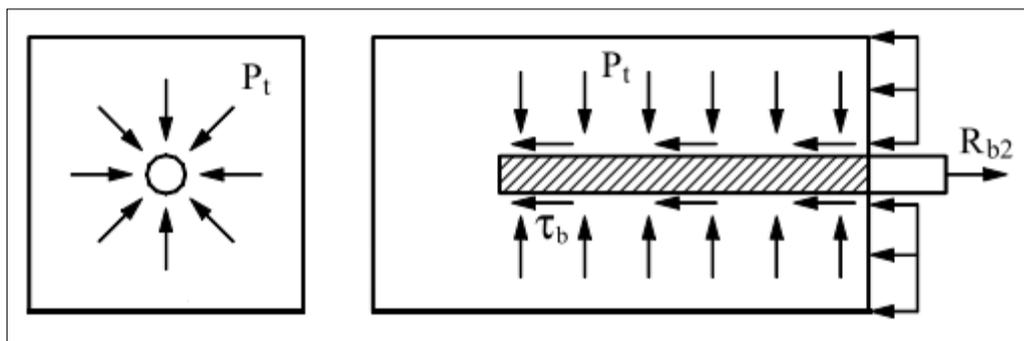


Figura 2 – Aderência por atrito
Fonte: Fusco (1995)

3.1.3. Aderência Mecânica

A parcela de aderência mecânica é decorrente da presença de saliências (nervuras) na superfície da barra. Tais saliências funcionam como peças de apoio (também conhecidos como “consolos de concreto”), ocasionando tensões de compressão no concreto. Este tipo de aderência é o mais eficiente e imprescindível para que se possam aproveitar as resistências mais elevadas do aço (FUSCO, 1995; LEONHARDT & MÖNNING, 1977).

A figura 3 demonstra que o efeito de aderência mecânica é encontrado também nas barras lisas, em razão das irregularidades superficiais decorrentes do processo de laminação (FUSCO, 1995).

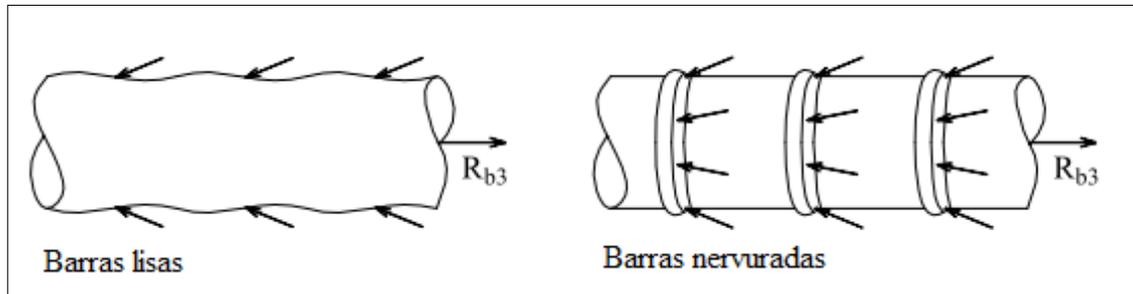


Figura 3 – Aderência mecânica
Fonte: Fusco (1995)

3.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA ADERÊNCIA

Entende-se por tensão de aderência a relação entre a força atuante na armadura e a área da barra aderente ao concreto. Essa tensão ocorre desde que aconteça variação de força no aço em um determinado trecho, que pode ser ocasionada por diversos parâmetros, os quais devem ser considerados quando se realiza o dimensionamento e análise de estruturas de concreto armado.

3.2.1. Adensamento

O adensamento quando mal executado prejudica a aderência, principalmente nas regiões de maiores concentrações de armaduras, uma vez que estas regiões apresentam maior dificuldade para concretagem e adensamento, principalmente quando o concreto apresenta baixa trabalhabilidade. Assim, possibilita o aparecimento de vazios, deixando a região deficiente (SILVA, 2010).

3.2.2. Resistência Mecânica do Concreto

A resistência mecânica do concreto é um dos fatores que mais influenciam a aderência entre aço e concreto. Em suma, quanto maior a resistência mecânica, maiores serão os esforços de aderência que o concreto poderá suportar na interface aço-concreto (SILVA, 2012).

3.2.3. Características Geométricas das Barras

A presença de nervuras nas barras de aço faz com que a aderência mecânica aumente muito, devido a formação de “consoles de concreto”. Nesse tipo de barras, o valor de aderência mecânica depende da altura, da distância livre entre nervuras e ainda, da forma e da inclinação das nervuras (LEONHARDT & MÖNNING, 1977).

3.2.4. Posição das Barras na Concretagem

Assim como a altura, a posição das barras durante a concretagem é essencial pois, a segregação do concreto fresco gera um acúmulo de água sob as barras, e mais tarde o concreto absorve essa água acumulada, deixando vazios os poros localizados na parte inferior das barras (figura 4). Por essa razão, a qualidade da aderência pode reduzir drasticamente. Desse modo, as barras concentradas na posição horizontal no topo da forma apresentam pior comportamento do que as concentradas no fundo (LEONHARDT & MÖNNING, 1977).

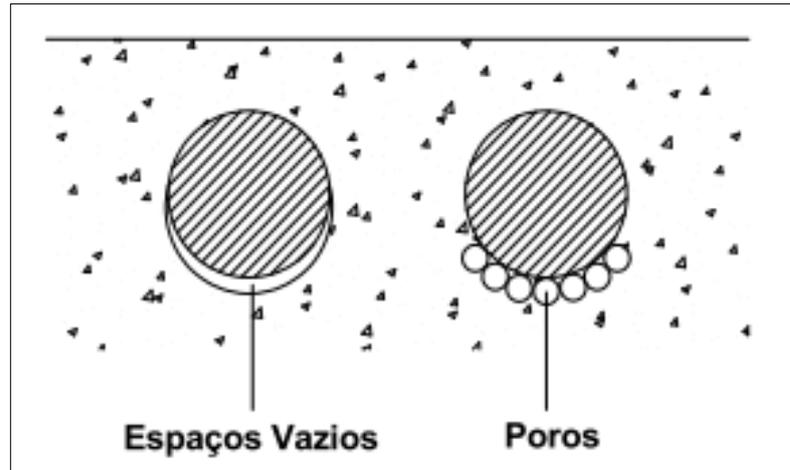


Figura 4 – Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais, devido à segregação e acumulação de água.

Fonte: Leonhardt & Mönning (1977)

Decorrente disso, a norma que trata a respeito de projeto de estruturas de concreto considera as barras de aço em situação de boa aderência quando estão em alguma das posições mencionadas abaixo e ilustradas na figura 5 (ABNT, 2003):

- a. Inclinação maior que 45° sobre a horizontal;
- b. Horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal, desde que:
 - Elementos estruturais com $h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
 - 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.
- c. Trechos de barras posicionadas diferentemente do citado acima, e em ocasiões que se utilizem de formas deslizantes, devem ser considerados em má situação quanto à aderência.

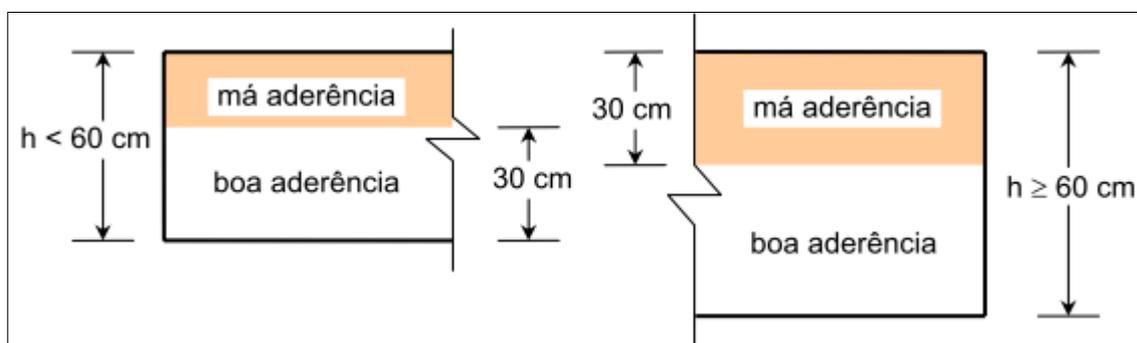


Figura 5 – Situações de boa e má aderência para armaduras horizontais

Fonte: Oliveira (2011)

3.2.5. Composição/Qualidade do Concreto

A influência do traço do concreto na aderência entre aço e concreto é pouco avaliada. De acordo com Leonhardt & Mönning (1977), pode-se admitir que a relação entre a resistência de aderência e a resistência à compressão do concreto é linear. Deste modo, qualquer variação no traço, desde que não se alterem os valores de resistência, também não altera o comportamento perante a aderência.

3.2.6. Idade de Carga

Chapman e Shah (1987, *apud* Silva, 2010) afirmam que em barras nervuradas a idade de carga influencia significativamente nas características de aderência. Porém o mesmo não foi observado para barras lisas, onde aumentando a resistência à compressão, a resistência de aderência permanece constante. Esse fato é justificado através da interação mecânica da barra nervurada e da resistência à compressão do concreto.

Em outro estudo, realizado por Fu e Chung (1998) citado por Silva (2010), constatou-se reduções nos valores de aderência à medida que a idade aumenta, a partir do sétimo até o vigésimo oitavo dia, pelo fato que há aumento no índice de vazios na interface entre aço e concreto em virtude da retração de secagem do concreto.

3.3. COMPORTAMENTO DE ADERÊNCIA

Aderência entre aço e concreto é definida como a relação entre tensão de aderência e deslizamento, sendo o deslizamento determinado através do deslocamento relativo entre os materiais graças à discrepância entre as deformações específicas dos mesmos. Foi proposto

CHAPMAN, R.; SHAH, S. Early-age bond strength in reinforced concrete. **ACI Journal Materials**, Michigan, v.84, n.6, p.501-510, 1987.

FU, X.; CHUNG, D. D.L. Decrease of the bond strength between steel rebar and concrete with increasing curing age. **Cement and Concrete Research**, USA, v.28, n.2, p.167-169, 1998

um modelo teórico onde tensões de aderência, deslizamentos e fissurações são relacionados, o qual é exposto na figura 6 (ROSSI, 2002).

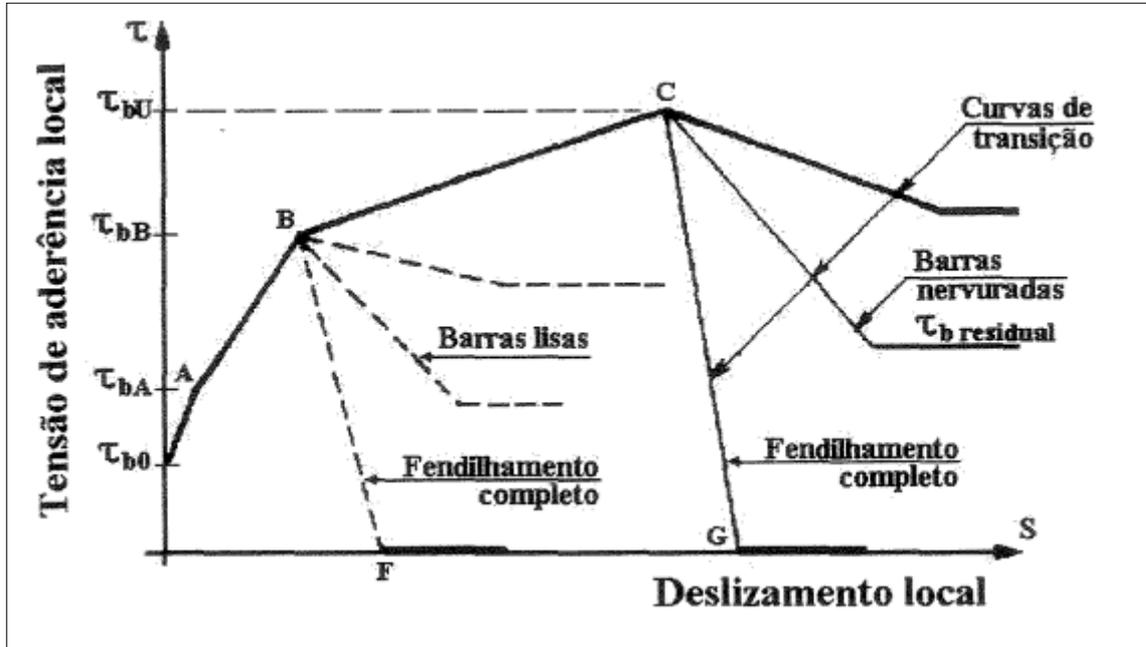


Figura 6 – Modelo Teórico da Curva de Aderência

Fonte: Tassios (1979) *apud* Rossi, (2002, p.13)

Segundo Tassios (1979, *apud* ROSSI 2002), no início do carregamento, aço e concreto permanecem em regime elástico, e como apresentam diferentes propriedades físicas, a armadura tem uma tendência de se movimentar em relação ao concreto. No momento em que a tensão atinge nível de τ_{b0} a aderência de natureza química (por adesão) é rompida, e após este, ocorre mobilização do engrenamento mecânico de pasta no caso de barras lisas e de argamassa no caso de barras nervuradas.

Quando as solicitações alcançam o nível de τ_{bA} começam surgir as primeiras fissuras internas transversais ao eixo da barra. À medida que os esforços vão aumentando, podem começar a aparecer fissuras de fendilhamento longitudinal. Ao atingir τ_{bB} as barras lisas são arrancadas do concreto, e em barras nervuradas as fissuras por fendilhamento podem se agravar e até ocorrer arrebentação do concreto devido ao mesmo (conforme reta BF da figura 6), ou em caso de confinamento da barra dentro do concreto, o deslizamento cresce a uma taxa muito superior, em razão da diminuição do confinamento e do esmagamento do concreto.

No ponto C ocorre a tensão última de aderência (τ_{bU}), onde é possível acontecer o arrancamento perfeito de barras nervuradas, pois o deslizamento total só é impedido pelo atrito concreto-concreto, até que se atinja o último estágio de tensão de aderência residual.

3.4. ENSAIOS DE ADERÊNCIA

Existem vários ensaios para determinação dos valores médios globais de aderência entre a armadura de aço e o concreto, tais como:

- Arrancamento excêntrico (*cantilever bond test*);
- Arrancamento com anel circunferencial (*ring pull-out test*);
- Flexão (*beam test*);
- Extremo de viga (*beam end test*);
- Quatro barras;
- Tração direta;
- Ensaio de arrancamento direto (*pull-out test*).

Sendo o ensaio de arrancamento direto o mais comum para determinação da tensão de aderência.

3.4.1. Ensaio de Arrancamento Direto (*Pull-Out Test*)

Esse ensaio é normalizado pela RILEM/CEB/FIP RC6 (CEB, 1983) e recomendado pela ASTM. Consiste no arrancamento de uma barra de aço, que apresenta um determinado comprimento de aderência e é posicionada no interior (geralmente no centro) de um corpo de prova de concreto o qual é colocado sobre placas de apoio em um equipamento de ensaio. Ambas as extremidades da barra são projetadas para fora do corpo de prova. Em um dos extremos da barra é aplicada a força de tração, e no outro mede-se o escorregamento (deslizamento), conforme figura 7.

O tamanho, forma do corpo-de-prova, posição e comprimento do trecho de aderência, influenciam consideravelmente os resultados do teste (LEONHARDT & MÖNNING, 1977).

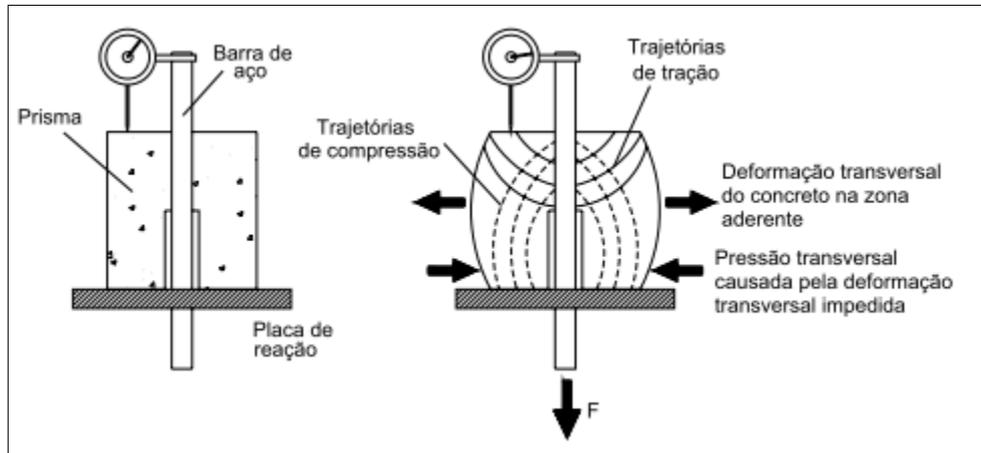


Figura 7 – Tensões principais no ensaio de arrancamento (*pull-out test*)
Fonte: Leonhard & Mönning (1977, apud Almeida Filho 2006)

Quando ocorre o rompimento da ligação aço-concreto, a barra se desloca com maior ou menor facilidade dentro do corpo-de-prova dependendo da rugosidade (barra lisa ou nervurada). O máximo valor de resistência permite obter a tensão de cisalhamento última da ligação (BARBOSA, *et al* 2013).

A figura 8 representa a forma como os resultados obtidos no ensaio são geralmente apresentados, sendo uma curva de variação do deslizamento em função da força de arrancamento.

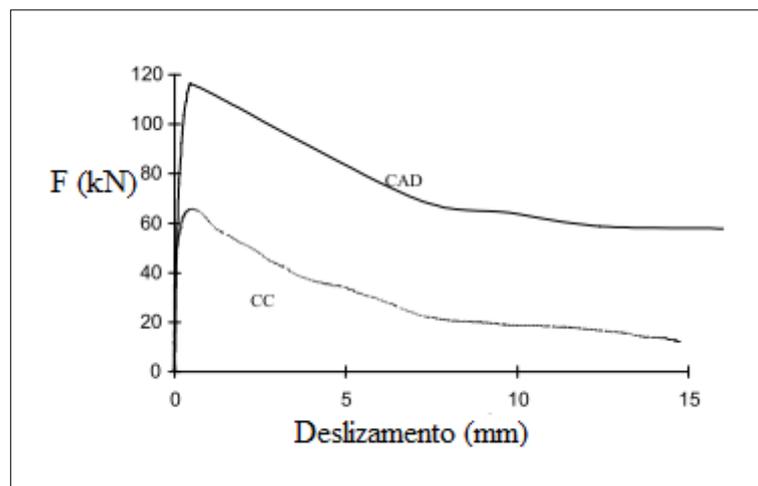


Figura 8 – Curva de ensaio de arrancamento direto
Fonte: Lorrain *et al* (2008)

Esse método de ensaio é criticado por alguns autores que afirmam que os resultados obtidos através do teste não são representativos para outros elementos estruturais, tais como vigas, pois o concreto fica confinado nas placas de apoio durante a execução do teste. Assim não é possível a ocorrência de fissuração e nem a expansão transversal do corpo-de-prova (atrito com a placa de apoio) e promovendo o confinamento na armadura. Entretanto, Barbosa *et al* (2013) ressaltam que o *pull-out test* é considerado um ensaio “real”, desde que sejam tomados alguns cuidados como comprimento de ancoragem e diâmetro das barras, pois os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento e de viga apresentam baixa variabilidade.

3.4.2. Ensaio de Arrancamento Direto Modificado (*Appropriate Pull-Out Test*)

Visando maior facilidade no ensaio de arrancamento direto e objetivando aplicabilidade do teste em canteiros de obra, um grupo de pesquisadores, liderado por Michel Lorrain, sugeriu uma adequação no ensaio *Pull-Out Test*, o qual é denominado ensaio Apulot.

O ensaio Apulot utiliza como molde para os corpos de prova garrafas PET cilíndricas, sendo que os mesmos não são desmoldados, para que diminua a deformação lateral. Outra característica é que as barras de aço possuem duas zonas não aderentes de modo que o comprimento de aderência fique bem no centro do corpo de prova (figura 9). E ainda, o equipamento utilizado para execução do ensaio é um macaco hidráulico (figura 10), equipamento que apresenta facilidade de transporte e manuseio além de apresentar valor monetário relativamente baixo, viabilizando o controle de qualidade em empresas de pequeno porte, e/ou obras longínquas.

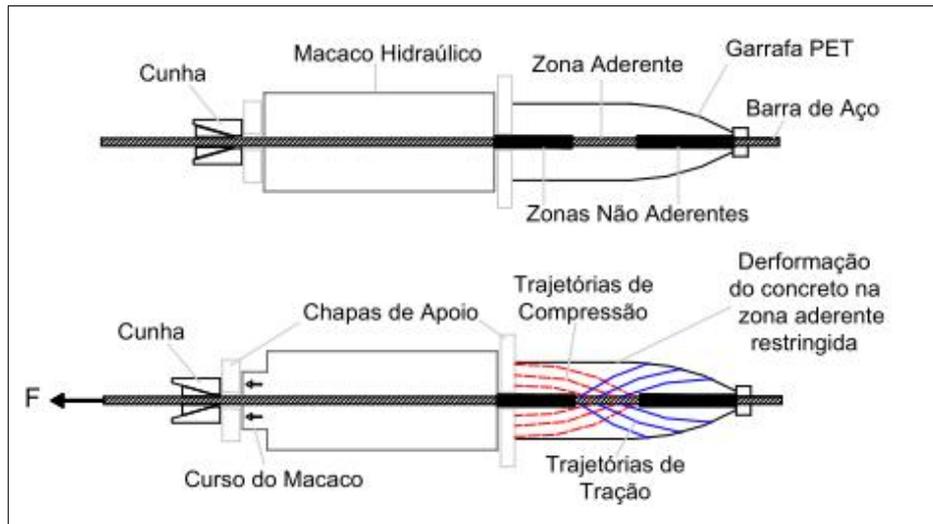


Figura 9 – Esquema de ensaio Apulot
Fonte: Silva (2010)



Figura 10 – Ensaio de arrancamento Apulot
Fonte: Lorrain e Barbosa (2008)

A zona aderente, conhecida como comprimento de ancoragem básico ou comprimento de aderência (L) depende da tensão última de aderência (τ_u), tensão de escoamento do aço (f_y) e do diâmetro da barra de aço (ϕ), pois conforme a NBR 6118 (ABNT, 2003, p.35), “comprimento de ancoragem é definido como comprimento reto de armadura necessário para ancorar a força limite nessa barra ($A_s f_{yd}$), admitindo resistência de aderência uniforme ao longo de tal comprimento”.

Admitindo equilíbrio entre as tensões última de aderência (equação 1) e de escoamento do aço (equação 2), obtém-se o equacionamento para determinação do comprimento de aderência (equação 3) (TAVARES, 2012):

$$\tau_u = F / \pi\phi L$$

Equação (1)

$$f_y = F / \pi R^2$$

Equação (2)

$$L = \phi f_y / 4\tau_u$$

Equação (3)

A tensão última de aderência é obtida através da curva de correlação (figura 11) resultante da pesquisa de Lorrain, a partir da resistência à compressão do concreto esperada.

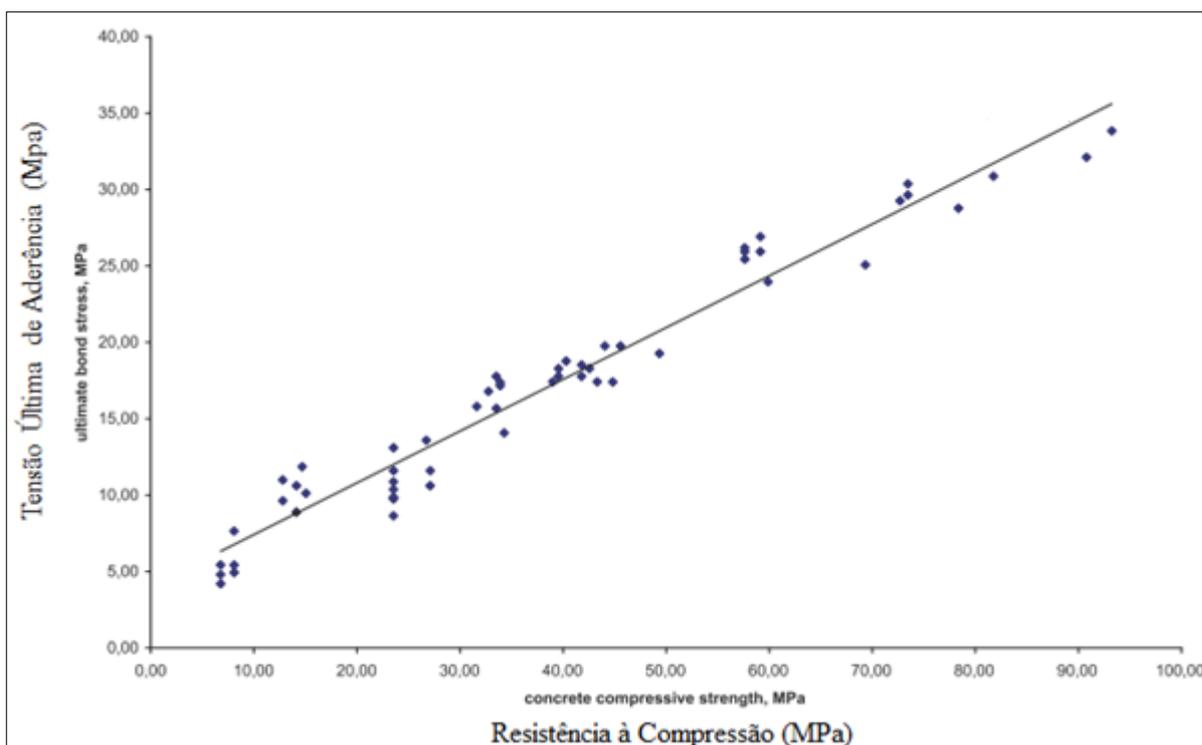


Figura 11 – Curva de correlação entre a tensão última de aderência e resistência à compressão obtida a partir do ensaio Apulot

Fonte: Adaptado de Lorrain *et al* (2011)

A curva de correlação entre tensão última de aderência e resistência à compressão (figura 11) foi obtida através de experimentos realizados com garrafa PET de 8 cm de diâmetro na parte central e vergalhão de 8 mm para que o modo de ruptura dominante fosse o deslizamento. Além disso, os comprimentos de aderência adotados variaram entre 80 e 135 mm (10 e 16,9 ϕ), uma vez que objetivavam verificar quanto e como essa variação afetaria nos resultados (LORRAIN *et al*, 2011).

A equação dessa curva, obtida através de regressão linear, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,96 e que possibilita estimar a resistência à compressão do concreto é apresentada abaixo:

$$\tau_u = 0,33f_c + 4,35$$

Equação (4)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Concreto

4.1.1.1. Tipo de Cimento

O cimento utilizado neste trabalho de pesquisa foi o Portland composto com pozolona CP II Z 32 da Votoran, pois é comumente utilizado na produção de concreto em canteiros de obras da região devido à facilidade de encontrá-lo no mercado local.

4.1.1.2. Agregado Miúdo

Como agregado miúdo, utilizou-se areia natural proveniente de União da Vitória – PR, obtido por doação de empresário do setor da construção civil.

4.1.1.3. Agregado Graúdo

Utilizou-se de brita B1 basáltica como agregado graúdo.

4.1.1.4. Aditivo

Visando a melhoria da trabalhabilidade e adensamento do concreto, empregou-se o aditivo hiperplastificante Glenium 3400 NV da fabricante BASF.

4.1.2. Aço

As barras de aço com superfície nervurada (vergalhões) utilizadas pertencem a categoria CA 50 da fabricante Gerdau, sendo que somente barras de diâmetros 10,0 e 12,5 mm foram empregadas.

4.1.3. Moldes para Corpos de Prova do Ensaio Apulot

Como moldes para os corpos de prova empregou-se garrafa PET de refrigerante com capacidade de 2 litros. A escolha de qual modelo utilizar, se fez devido a maior disponibilidade.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Determinação dos Parâmetros

Inicialmente determinou-se que o estudo seria feito em concreto convencional de 25 MPa pelo fato de que o Apulot tem como objetivo controlar a qualidade no próprio canteiro de obras, então, é coerente que se adote uma resistência usualmente alcançada em concretos dosados em obra.

A partir disso, pode-se entrar no gráfico da figura 12 com o nível de resistência desejado e obter a tensão última de aderência.

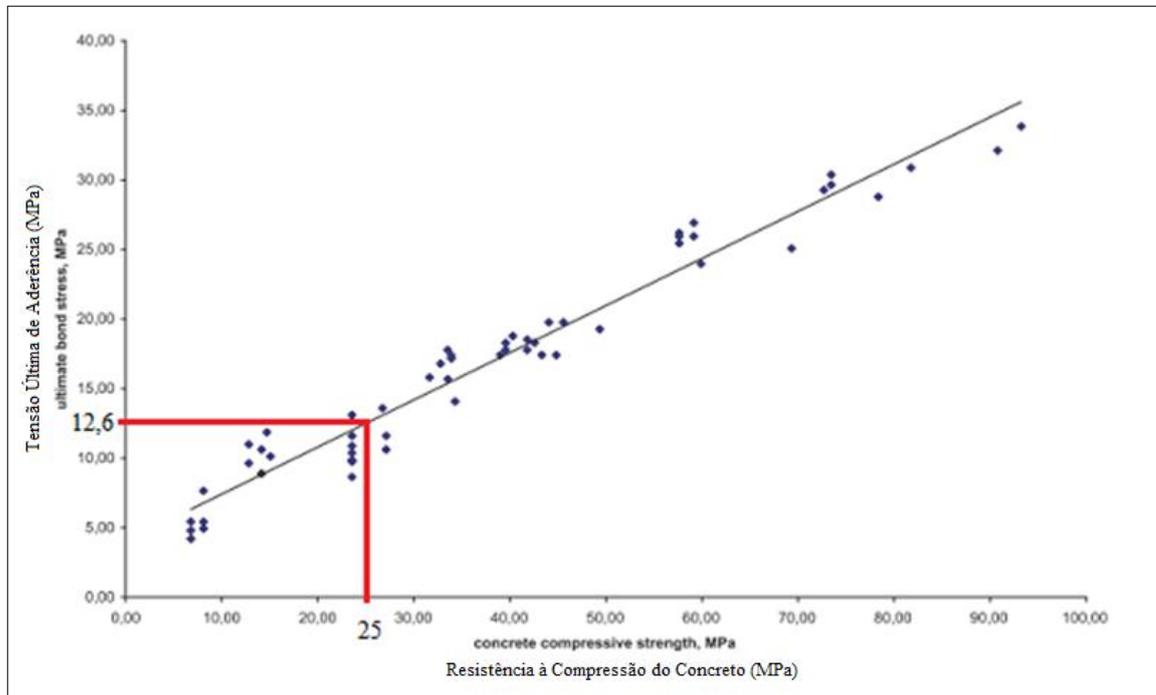


Figura 12 – Tensão última de aderência para resistência à compressão de 25 MPa
Fonte: Adaptado de Lorrain *et al* (2011)

Além desse método, é possível utilizar-se da equação (4) para determinação da tensão última de aderência:

Em ambos os casos, o concreto de 25 MPa apresenta tensão última de aderência de 12,6 MPa.

4.2.2. Determinação dos Comprimentos de Aderência

Os comprimentos de aderência a serem analisados foram obtidos através do carregamento que se esperava. Optou-se por utilizar valores baixos, uma vez que havia necessidade de confeccionar o dispositivo para ensaio e este poderia não suportar cargas elevadas. Partindo do conceito que tensão é a razão entre força aplicada e superfície resistente, e tendo o objetivo de avaliar diferentes diâmetros de barras, encontraram-se os valores expostos na tabela 1 para os comprimentos de aderência. Além disso, determinou-se que seriam ensaiados 3 corpos de prova para cada comprimento:

Tabela 1 – Comprimentos de Aderência

| \varnothing (mm) | Carregamento Esperado (kN) | Comprimento de Aderência | Comprimento de Aderência (mm) | Número de Corpos de Prova |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 12,5 | 25 | 4,1 \varnothing | 51 | 3 |
| 10,0 | 25 | 6,3 \varnothing | 63 | 3 |
| 12,5 | 50 | 8,1 \varnothing | 101 | 3 |
| 10,0 | 50 | 12,6 \varnothing | 126 | 3 |

Fonte: A Autora (2014)

4.2.3. Dosagem e Preparo do Concreto

Conforme citado anteriormente, o nível de resistência do concreto a ser utilizado nesta pesquisa foi determinado como 25 MPa. O método adotado para dosagem do concreto foi o da ABCP/ACI o qual se utiliza de alguns parâmetros de dosagem como massas específica e unitária, análise granulométrica e nível de resistência dos materiais a serem utilizados. Para obtenção desses valores foram realizados ensaios de acordo com normas da ABNT, cujos resultados são apresentados no apêndice A.

Havia a necessidade de saber exatamente a idade em que o concreto apresentaria 25 MPa e por conta disto, moldaram-se vários corpos de prova de concreto para ensaios de compressão axial, sendo 3 destinados para cada idade.

O traço obtido para resistência característica de 25 MPa, com os materiais disponíveis, apresenta teor de argamassa de 44%, relação água/materiais secos de 8,8% e é apresentado na tabela 2:

Tabela 2 – Traço do Concreto

| Material | Traço | Consumo (kg/m ³) |
|-----------------|-----------------------|------------------------------|
| Cimento | 1 | 380 |
| Agregado Miúdo | 1,57 | 596,6 |
| Agregado Graúdo | 3,26 | 1238,8 |
| Água | 0,513 | 195 |
| Aditivo | 0,085% ⁽¹⁾ | 0,324 |

Fonte: A Autora (2014)

Nota: (1) Porcentagem referente à massa de cimento

A tabela 3 expressa a ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira:

Tabela 3 – Tempo de Mistura do Concreto

| Material | Tempo |
|---------------------------------|--------------|
| 100% agregado graúdo | 30'' |
| 75% água | 30'' |
| 100% areia | 1' |
| 100% cimento | 1' |
| 25% água | 30'' |
| 100% aditivo hiperplastificante | 5' |

Fonte: A Autora (2014)

É válido ressaltar que antes da confecção do concreto fez-se imprimação da betoneira com 10% da quantidade de concreto a ser produzida, excluindo-se apenas o aditivo.

4.2.4. Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Os corpos de prova para ensaio de resistência à compressão axial foram moldados de acordo com a NBR 5738 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Utilizaram-se moldes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A forma de adensamento adotada foi manual com haste metálica, sendo feita a concretagem em duas camadas e adensadas cada uma com 12 golpes.

Nas primeiras 24 horas (cura inicial) os corpos de prova ficaram em local protegido, livre de vibrações e de intempéries. Posteriormente os mesmos foram encaminhados à câmara úmida com temperatura controlada de 24° C e foram retirados somente para realização do ensaio.

Para execução do ensaio retificaram-se as bases dos corpos de prova de modo que as mesmas ficassem lisas e livres de ondulações e abaulamentos e utilizou-se de prensa hidráulica manual analógica para realização dos ensaios.

As idades de ensaio não seguiram as indicações da NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – uma vez que o objetivo do ensaio era identificar a idade exata em que o concreto apresentava resistência de 25 MPa, e não sua evolução com o tempo.

4.2.5. Ensaio de Arrancamento Direto Modificado (Apulot)

Os corpos de prova foram confeccionados de modo que seguissem o esquema representado na figura 13.

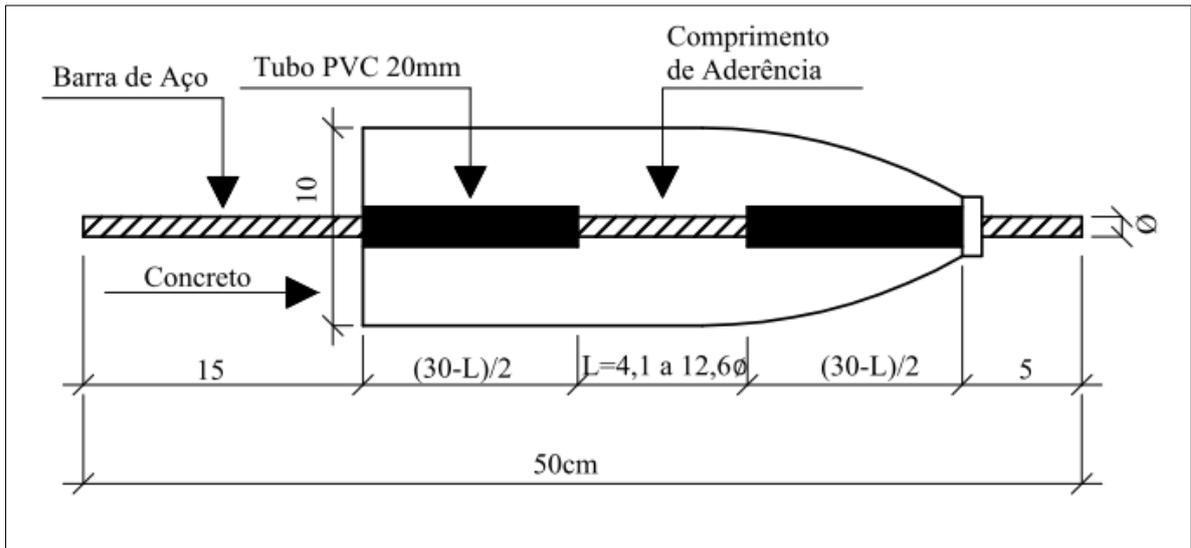


Figura 13 – Esquema do molde dos corpos de prova destinados ao ensaio Apulot
Fonte: A Autora (2014)

Inicialmente os vergalhões foram cortados em pedaços de 50 cm e então se vedaram as barras com auxílio de fita isolante e tubo plástico de PVC com diâmetro de 20 mm, livrando apenas os respectivos comprimentos de aderência, conforme ilustração da figura 14.



Figura 14 - Delimitação do comprimento de Aderência
Fonte: A Autora (2014)

As tampas das garrafas foram furadas com diâmetro um pouco menor que a barra de aço a ser utilizada com auxílio de furadeira. Posteriormente as barras foram aquecidas para que fosse possível a passagem pela tampa e assim garantindo que não haveria escorregamento da mesma. A outra extremidade das garrafas foi cortada com tesoura, visando a facilidade de enchimento e adensamento no momento da concretagem, bem como para se obter uma maior superfície de contato com o dispositivo de ensaio, conforme ilustra a figura 15:



Figura 15 – Molde de garrafa PET
Fonte: A Autora (2014)

Para a concretagem, as PETs foram apoiadas em moldes cilíndricos (figura 16) e metálicos (padrão para corpos de prova de ensaio de resistência à compressão axial), e seus volumes foram preenchidos por duas camadas de concreto produzido na mesma betonada que os corpos de prova do ensaio de resistência à compressão, sendo cada uma adensada com 20 golpes de haste metálica. Decorridas 24 horas da concretagem, os corpos de prova foram colocados em câmara úmida com temperatura controlada de 24° C e lá ficaram até o dia da execução do ensaio exatamente sob mesmas condições de cura que os corpos de prova destinados ao outro ensaio (de compressão axial).



Figura 16 – Concretagem dos moldes para ensaio Apulot
Fonte: A Autora (2014)

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios da fabricante EMIC, pois o objetivo deste trabalho é verificar a eficiência do método e não implantá-lo em canteiro de obra. Para tanto, elaborou-se um dispositivo para apoiar o corpo de prova, limitando o deslocamento do concreto e assim, ao exercer força de tração no aço, somente ele estaria sendo deslocado. O dispositivo produzido inicialmente (figura 18 (a)) não suportou as solicitações, ocorrendo flambagem nas barras verticais e flexão nas barras horizontais quando o carregamento atingiu cerca de 15 kN.

Posteriormente esse mesmo dispositivo foi enrijecido, e entre o corpo de prova e o dispositivo, utilizou-se de um neoprene circular como forma de capeamento e um disco metálico de mesmo diâmetro para que as tensões de compressão fossem distribuídas em toda face do concreto, de modo que os ensaios pudessem ser realizados a contento. A representação do dispositivo é apresentada na figura 17 e o suporte pronto para ensaio encontra-se na figura 18 (b).

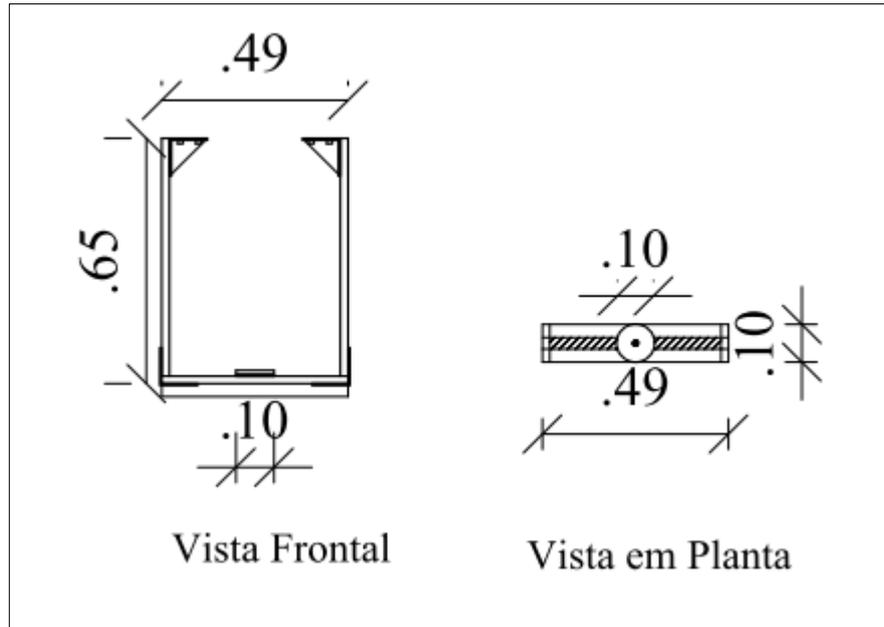


Figura 17 - Esquema do dispositivo elaborado para o ensaio
Fonte: A Autora (2014)

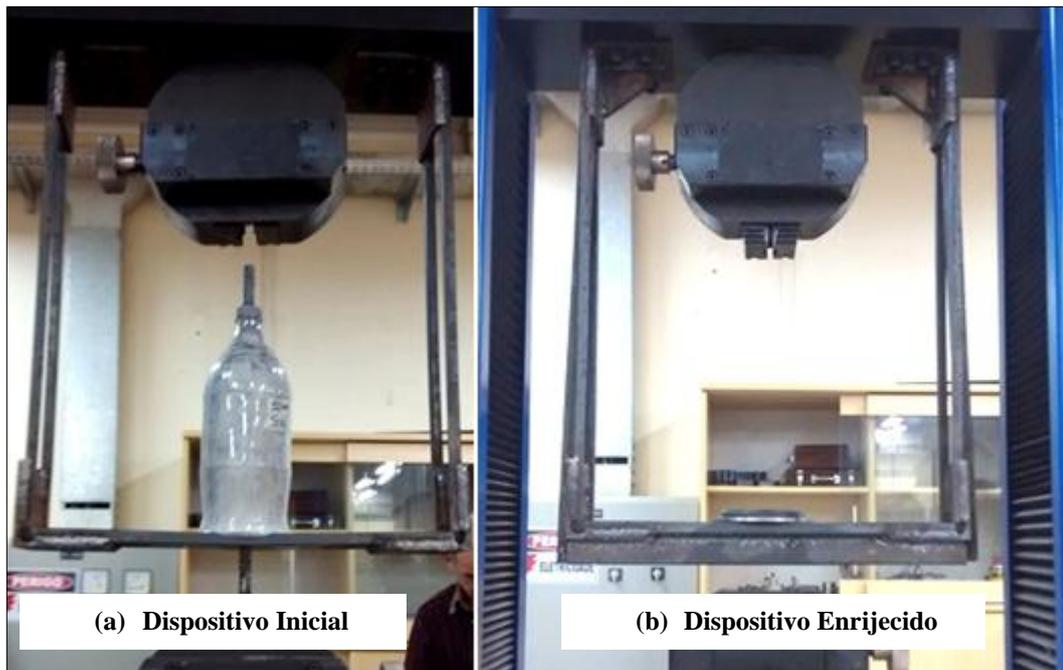


Figura 18 – Dispositivo elaborado para execução do ensaio Apulot
Fonte: A Autora (2014)

Em virtude do primeiro dispositivo não ter suportado as solicitações, os corpos de prova demoraram a ser ensaiados, de modo que quando o segundo ficou pronto, os corpos de prova já haviam extrapolado a resistência determinada, ou seja, apresentavam valores superiores a 25 MPa. Desse modo, os ensaios foram realizados duas vezes: a primeira, utilizando desses corpos de prova de resistência superior e a segunda com a resistência de 25 MPa.

De acordo com o exposto no capítulo 4, nota-se que o trabalho obedece a uma trajetória, visando atingir os objetivos propostos a qual pode ser visualizada na figura 19.

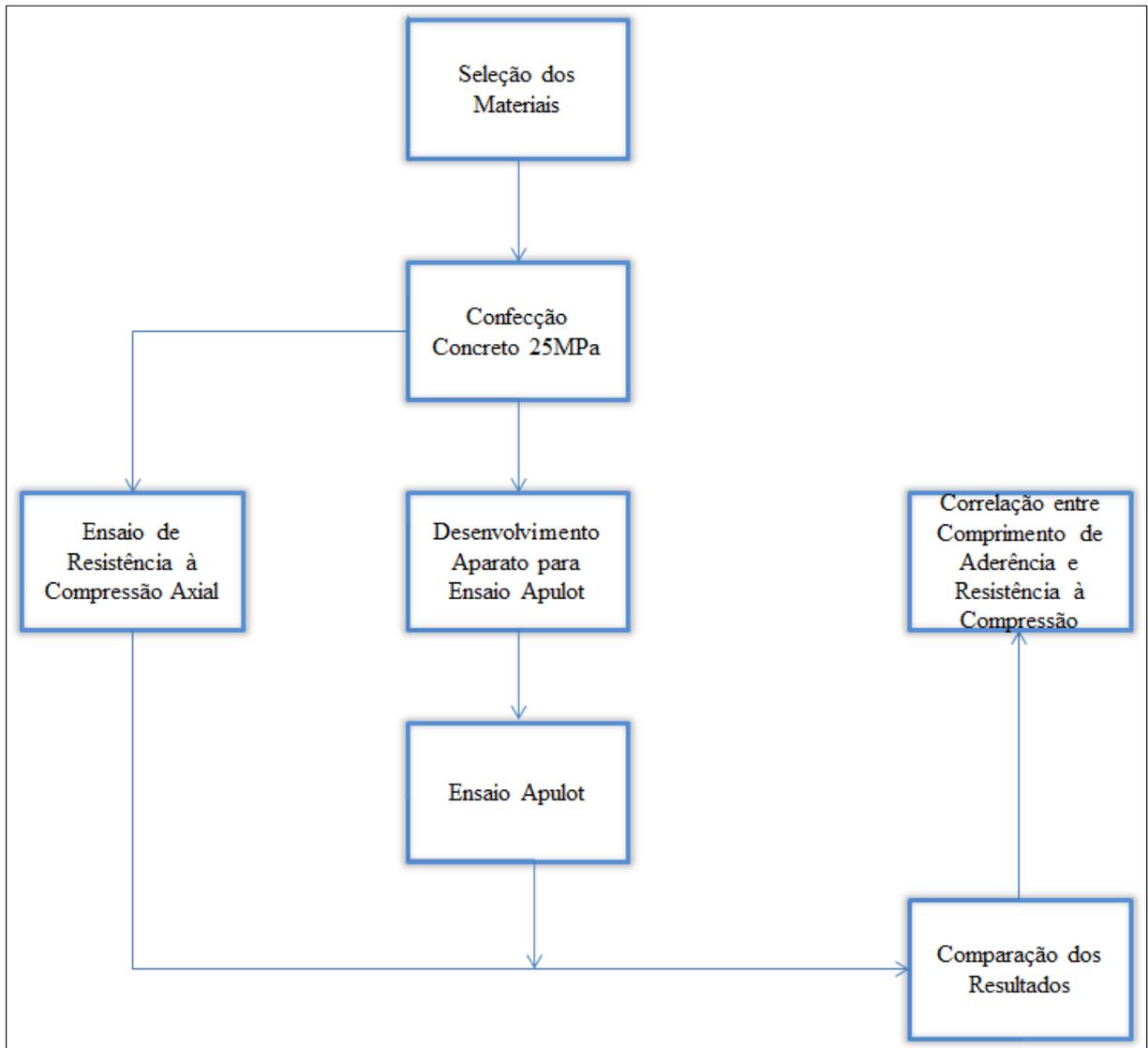


Figura 19 – Fluxograma de pesquisa
Fonte: A Autora (2014)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

5.1.1. Primeira Moldagem

Na primeira moldagem foram confeccionados 9 corpos de prova para realização do ensaio de resistência à compressão axial, sendo 3 ensaiados na idade de 16 dias, 3 na idade de 20 dias e os últimos 3, na idade de 24 dias. A tabela 4 exhibe os valores médios encontrados em cada uma destas idades, bem como valores de desvio padrão e coeficiente de variação obtidos de acordo com indicações do anexo B “Avaliação estatística de desempenho do ensaio” (ABNT, 2007).

Tabela 4 - Resistência à compressão axial média – 1ª Moldagem

| Idade (dias) | Resistência à Compressão Média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coefficiente de Variação |
|---------------------|---|----------------------------|---------------------------------|
| 16 | 21,2 | 0,2507 | 1,2% |
| 20 | 21,6 | 0,7521 | 3,5% |
| 24 | 30,6 | 1,2534 | 4,1% |

Fonte: A Autora (2014)

Os valores da tabela 4 geram uma curva de evolução da resistência com o passar dos dias (gráfico 1). Ao se adicionar uma linha de tendência polinomial de grau 2 a esse gráfico, é possível estimar o valor da resistência à compressão do concreto aos 26 dias, uma vez que seu coeficiente de determinação (R^2) é 1, ou seja, representa 100% o comportamento da curva. Sabe-se que o mais correto seria ter o valor exato, porém, para fim de comparação com a outra moldagem, adotar-se-á esse método.

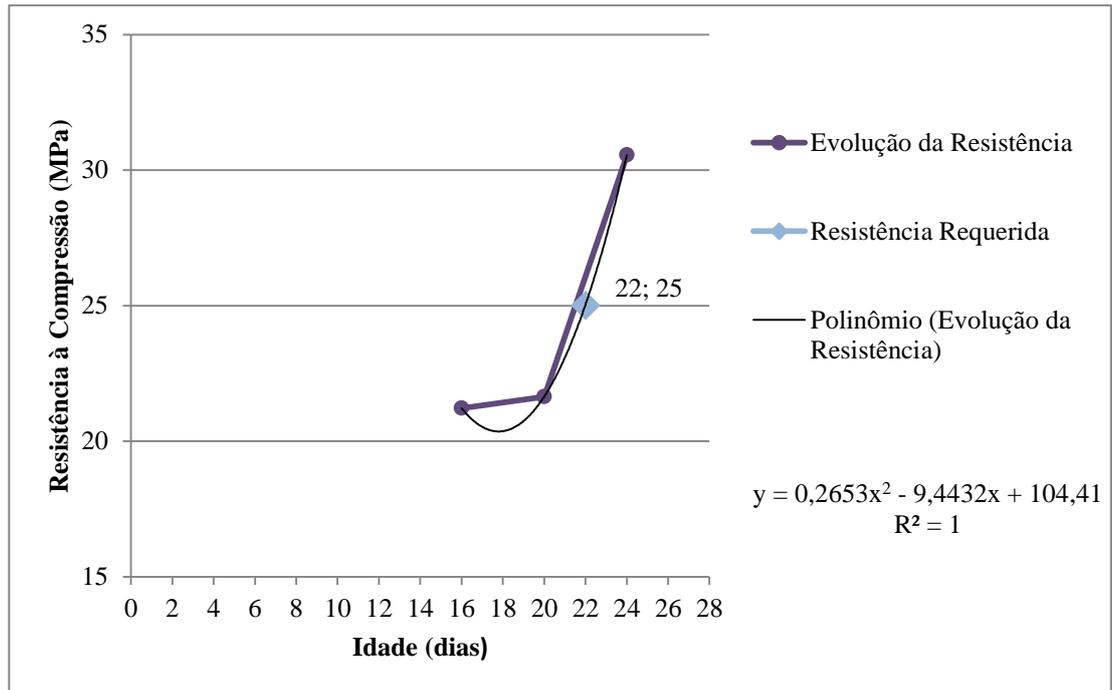


Gráfico 1 – Evolução da resistência à compressão – 1ª Moldagem
Fonte: A Autora (2014)

Utilizando-se da equação polinomial apresentada no gráfico 1, obtém-se que aos 26 dias a resistência à compressão é de 38,230 MPa. Observa-se um acréscimo de cerca de 8 Mpa, aproximadamente 25% em apenas dois dias na resistência à compressão. Isso poderia acontecer de fato em concretos de baixas idades e confeccionados com cimentos de alta resistência inicial, porém não é o caso, visto que o concreto foi produzido com cimento lento (gera calor em menor velocidade) e já se encontra em idade avançada. Porém, para fins comparativos adotou-se esse valor.

5.1.2. Segunda Moldagem

Os ensaios de resistência à compressão axial para os corpos de prova confeccionados na segunda moldagem foram realizados nas idades de 3, 7, 12 e 16 dias, sendo três corpos de prova ensaiados em cada idade. A tabela 5 apresenta os valores de resistência à compressão média, bem como os parâmetros obtidos através de avaliação estatística de desempenho do ensaio, de acordo com o anexo B da NBR 5739.

Tabela 5 – Resistência à compressão axial média

| Idade (dias) | Resistência à Compressão Média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coefficiente de Variação |
|--------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------------|
| 3 | 15,7 | 0,251 | 1,6% |
| 7 | 20,7 | 0,451 | 2,2% |
| 12 | 24,8 | 0,476 | 1,9% |
| 16 | 26,8 | 0,953 | 3,6% |

Fonte: A Autora (2014)

A NBR 5739, ainda em seu anexo B, avalia a eficiência das operações de ensaio através do coeficiente de variação. Para todas as idades, obtiveram-se valores de coeficiente de variação inferior a 3,0, caracterizando os procedimentos como excelente (nível 1). Assim tem-se a confiabilidade que todos os corpos de prova produzidos com esse concreto e mantidos sob mesmas condições de cura, apresentam a mesma resistência à compressão. Desse modo, os corpos de prova moldados para o ensaio Apulot foram ensaiados com idade de 12 dias, pois a resistência se apresentava com o valor requerido, conforme exibe o gráfico 2.

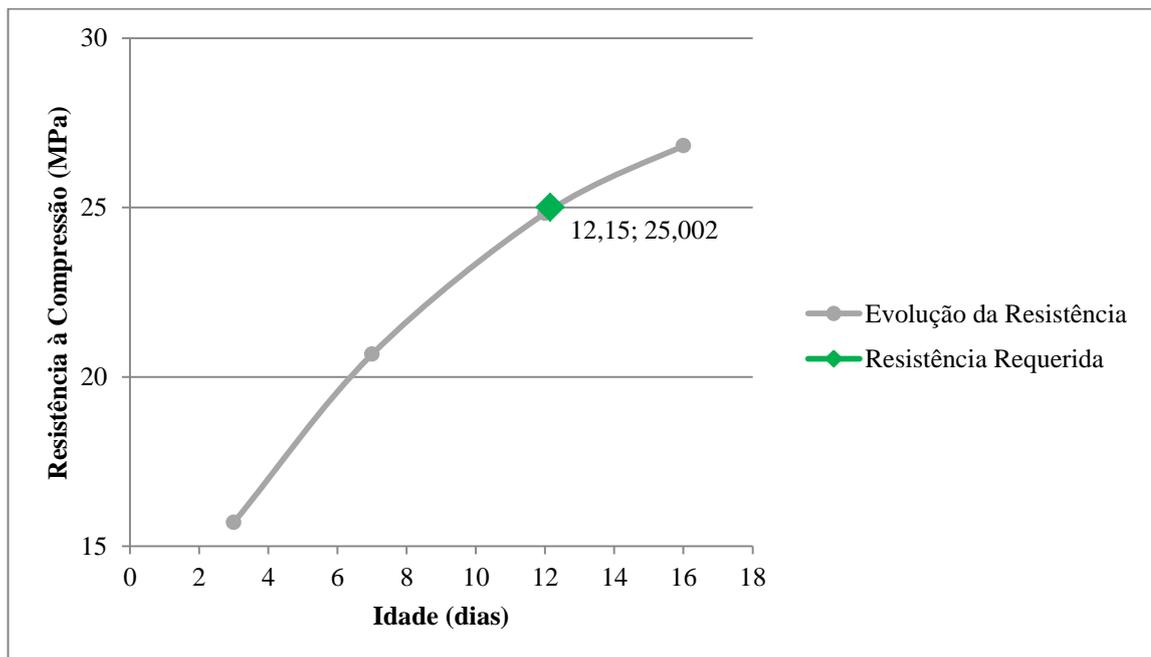


Gráfico 2 – Evolução da resistência à compressão axial média

Fonte: A Autora (2014)

Observa-se um comportamento muito distinto entre os valores de resistência à compressão axial do concreto para as diferentes moldagens. Apesar de ter sido adotado o mesmo traço, acredita-se que isso ocorreu pelo fato de ter se utilizado agregados provenientes de diferentes fornecedores.

5.2. APULOT

5.2.1. Primeira Moldagem

Devido ao problema com o primeiro dispositivo, o ensaio Apulot foi realizado nos corpos de prova com 26 dias de idade, onde se desconhece o valor exato da resistência à compressão axial, uma vez que não havia mais corpos de prova cilíndricos para realização do ensaio de compressão. Porém pela curva do gráfico 1, é possível observar que a resistência era superior a 25 MPa (aproximadamente 38,230 MPa).

Os resultados médios encontrados nestes ensaios estão expostos na tabela 6, enquanto os valores individuais dos corpos de prova são exibidos na tabela C.1 no apêndice C.

Tabela 6 - Resistência à compressão estimada através do ensaio Apulot – 1ª Moldagem

| \varnothing (mm) | Comprimento de Aderência (mm) | Força Máxima Média (kN) | Tensão de Aderência Média (MPa) / Desvio Padrão (MPa) | Resistência à Compressão Estimada (MPa) ⁽¹⁾ |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------|---|---|
| 12,5 | 4,1 \varnothing | 36,076 | 17,831 / 0,118 | 40,8 |
| 10,0 | 6,3 \varnothing | 34,445 | 17,403 / 1,606 | 39,5 |
| 12,5 | 8,1 \varnothing | 63,064 | 15,861 / 0,335 | 34,9 |
| 10,0 | 12,6 \varnothing | 51,317 | 12,964 / 0,140 | 26,1 |

Fonte: A Autora (2014)

Nota: (1) Valores encontrados através da correlação de Lorrain e Barbosa (equação 4)

5.2.2. Segunda Moldagem

O ensaio de aderência Apulot foi realizado 12 dias após moldagem dos corpos de prova, sendo esta a idade em que a resistência à compressão do concreto atingiu o nível de 25 MPa. Os resultados médios obtidos são apresentados na tabela 7, ao passo que o valor de cada corpo de prova individualmente está contido na tabela C.2 no apêndice C.

Tabela 7 – Resistência à compressão estimada através do ensaio Apulot – 2ª Moldagem

| \emptyset (mm) | Comprimento de Aderência (mm) | Força Máxima Média (kN) | Tensão de Aderência Média (MPa) / Desvio Padrão (Mpa) | Resistência à Compressão Estimada (MPa) ⁽¹⁾ |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------|---|---|
| 12,5 | 4,1 \emptyset | 34,598 | 17,275 / 0,384 | 39,167 |
| 10,0 | 6,3 \emptyset | 26,600 | 13,440 / 0,474 | 27,545 |
| 12,5 | 8,1 \emptyset | 49,295 | 12,428 / 0,329 | 24,480 |
| 10,0 | 12,6 \emptyset | 43,188 | 10,911 / 1,204 | 19,880 |

Fonte: A Autora (2014)

Nota: (1) Valores encontrados através da correlação de Lorrain e Barbosa (equação 4)

Ao realizar os ensaios para segunda moldagem, foram salvas as curvas tensão deformação para todos os corpos de prova, as quais podem ser visualizadas nos gráficos 3 a 6.

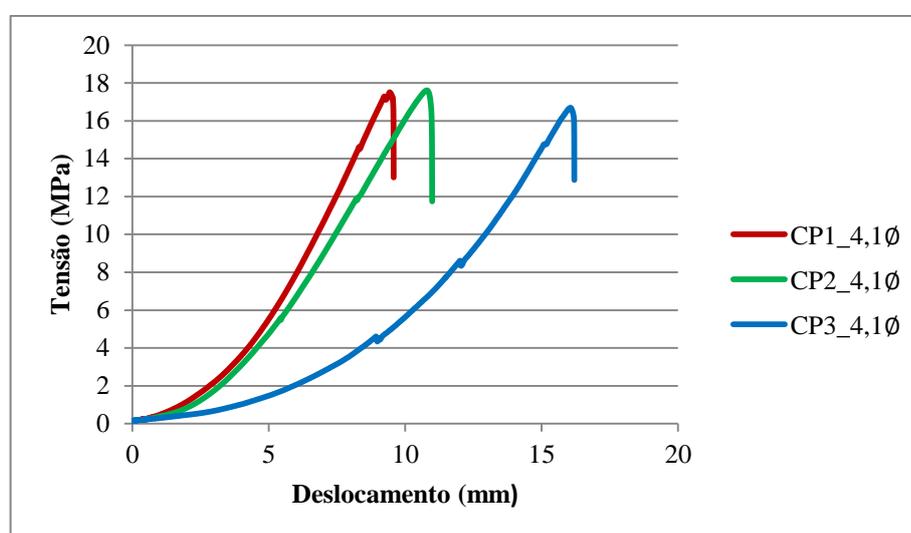


Gráfico 3 - Tensão versus deslizamento - Comprimento de aderência 4,1 \emptyset - Barra de 12,5 mm

Fonte: A Autora (2014)

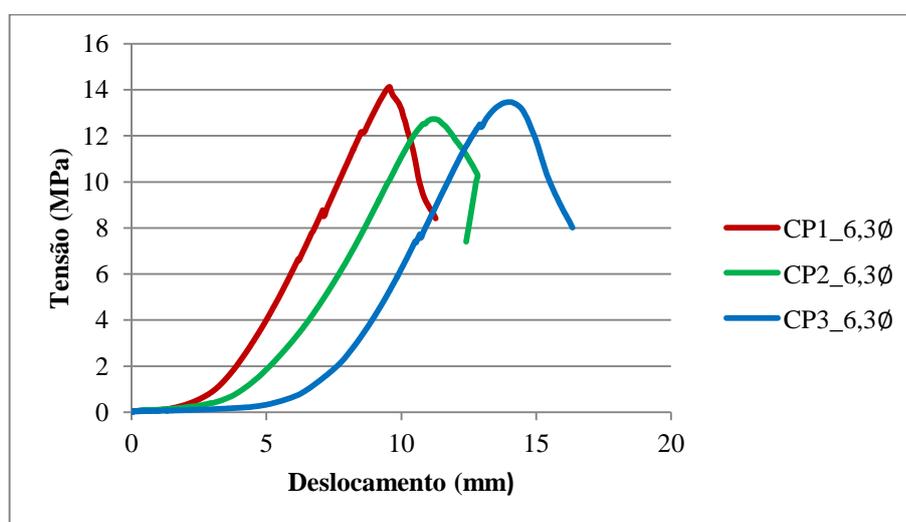


Gráfico 4 - Tensão versus deslizamento - Comprimento de aderência 6,3 \emptyset - Barra de 10,0 mm

Fonte: A Autora (2014)

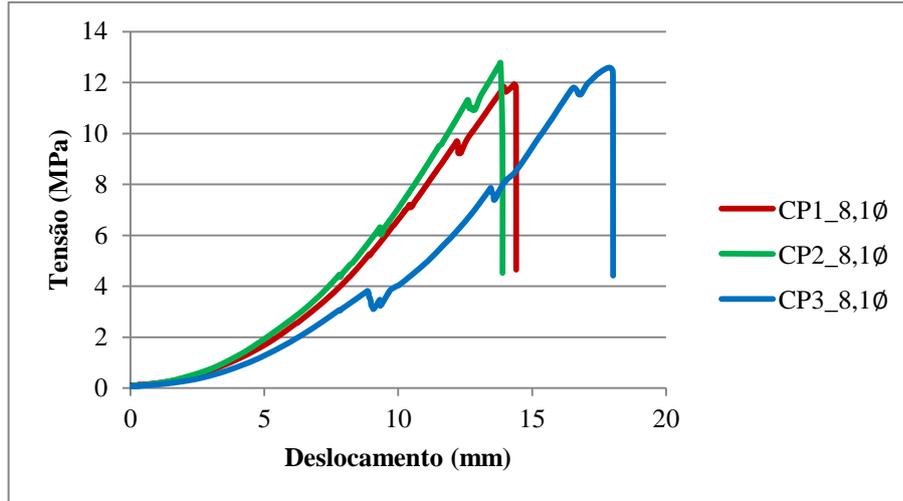


Gráfico 5 - Tensão versus deslizamento - Comprimento de aderência de 8,10 - Barra de 12,5 mm

Fonte: A Autora (2014)

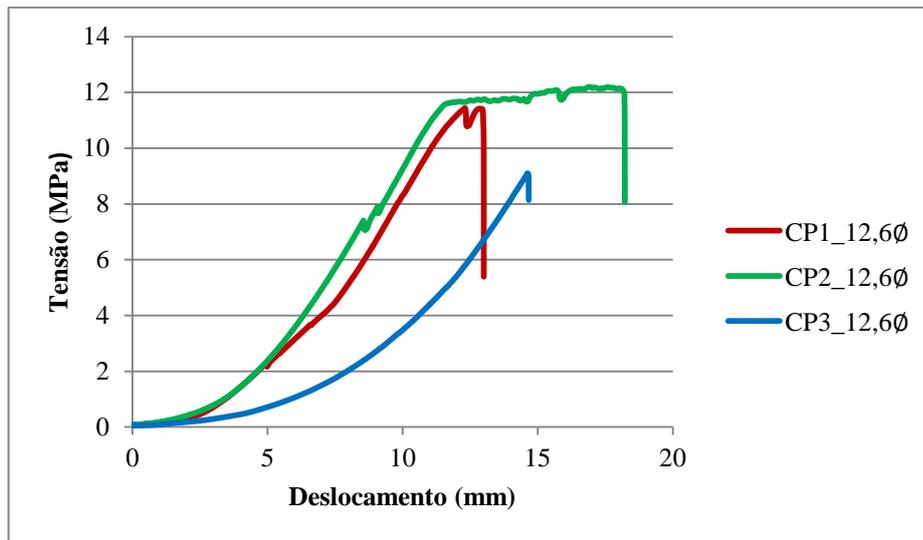


Gráfico 6 - Tensão versus deslizamento - Comprimento de aderência de 12,60 - Barra de 10,0 mm

Fonte: A Autora (2014)

Nos gráficos 3 a 6 é possível visualizar mesmo comportamento para corpos de prova de igual comprimento de aderência.

5.3. DISCUSSÕES

Nas tabelas 6 e 7 é possível observar uma grande variação entre os valores obtidos de tensão de aderência para os diferentes comprimentos de aderência avaliados. Sendo assim, realizou-se um comparativo dos valores obtidos com a curva de Lorrain (gráficos 7 e 8), admitindo que na moldagem 1 a resistência à compressão do concreto no momento do ensaio Apulot era de 38,230 MPa e, sabendo que na execução do ensaio para os corpos de prova da segunda moldagem, a mesma era de 25 MPa.

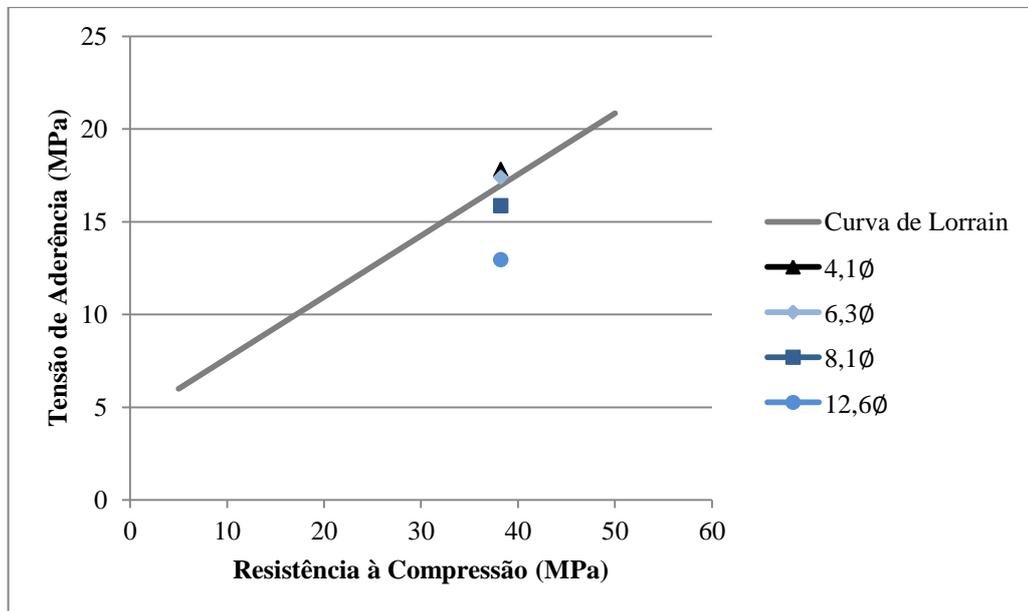


Gráfico 7 - Confronto entre valores obtidos e curva de correlação encontrada por Lorrain – 1ª Moldagem

Fonte: A Autora (2014)

Para a resistência de 38,230 MPa, observa-se que os comprimentos de aderência de 4,1Ø e 6,3Ø apresentam os valores mais próximos a curva.

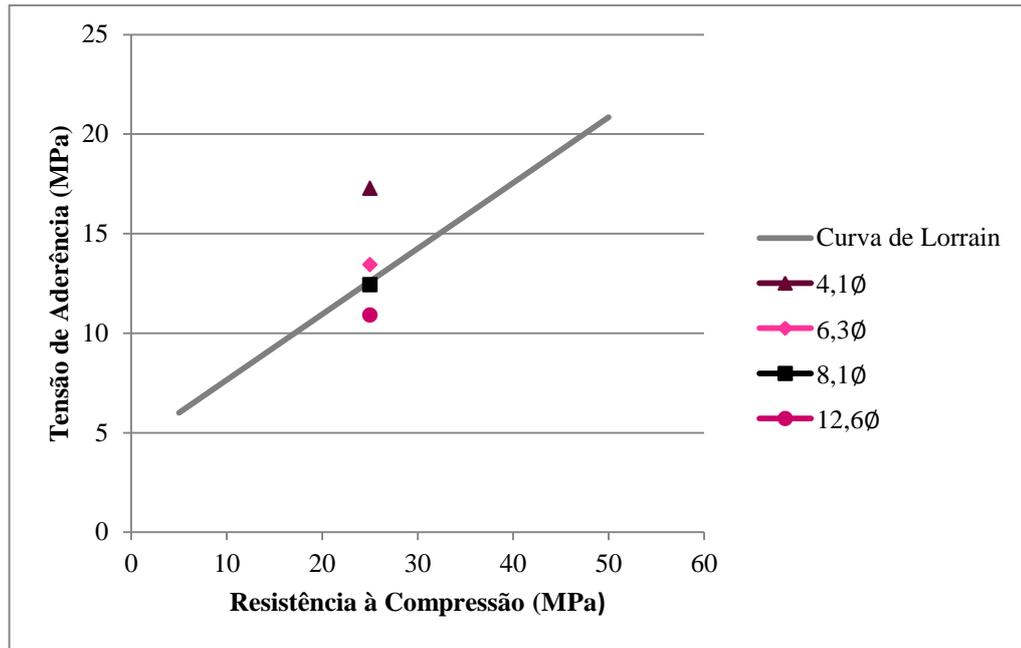


Gráfico 8 - Confronto entre valores obtidos e curva de correlação encontrada por Lorrain – 2ª Moldagem
Fonte: A Autora (2014)

Já para a resistência de 25 MPa, nota-se que o resultado mais satisfatório é o obtido com o comprimento de aderência de 8,1Ø.

O gráfico 9 apresenta o comportamento da resistência estimada em função do comprimento de aderência, para ambos os concretos.

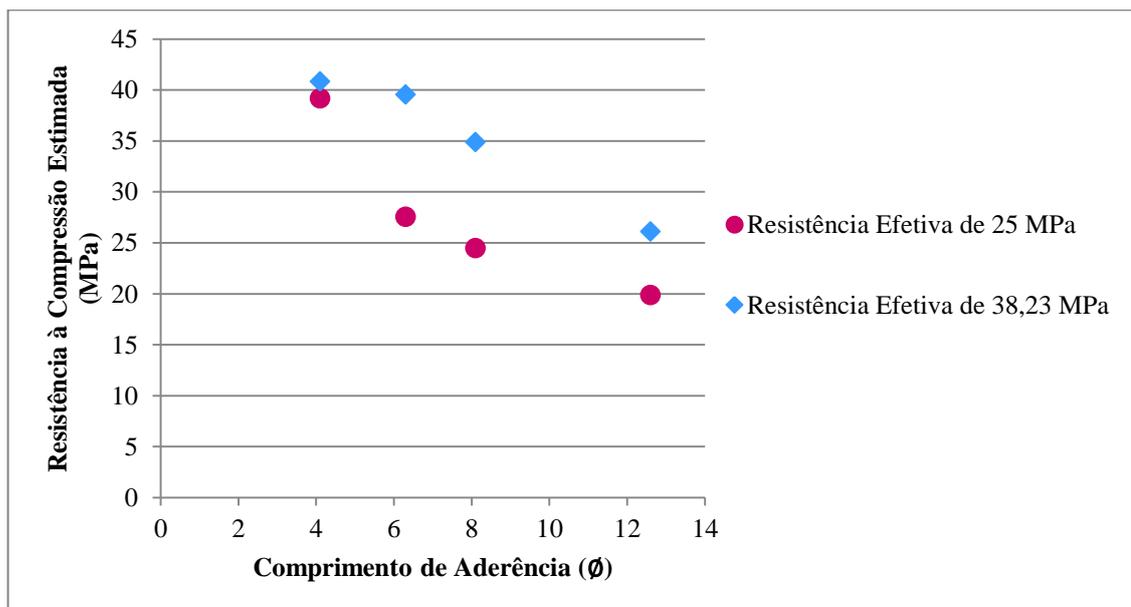


Gráfico 9 - Resistência à compressão estimada versus comprimento de aderência
Fonte: A Autora (2014)

O gráfico 9 deixa claro que a resistência diminui à medida que o comprimento de aderência aumenta, de modo que, para concreto de resistências efetivas mais altas, corpos de prova confeccionados com menores comprimentos de aderência irão apresentar resultados mais próximos ou até exatos, ao passo que, ensaios realizados com concretos de menores resistências e maiores comprimentos de aderência, também irão apresentar resultados satisfatórios.

Nos gráficos 3 a 6 pode-se observar que o comportamento de ruptura para corpos de prova confeccionados com mesmo comprimento de aderência foram semelhantes. Utilizando-se da curva de um corpo de prova de cada comprimento elaborou-se o gráfico 10 o qual deixa evidente e que a tensão de aderência é superior para menores comprimentos de aderência.

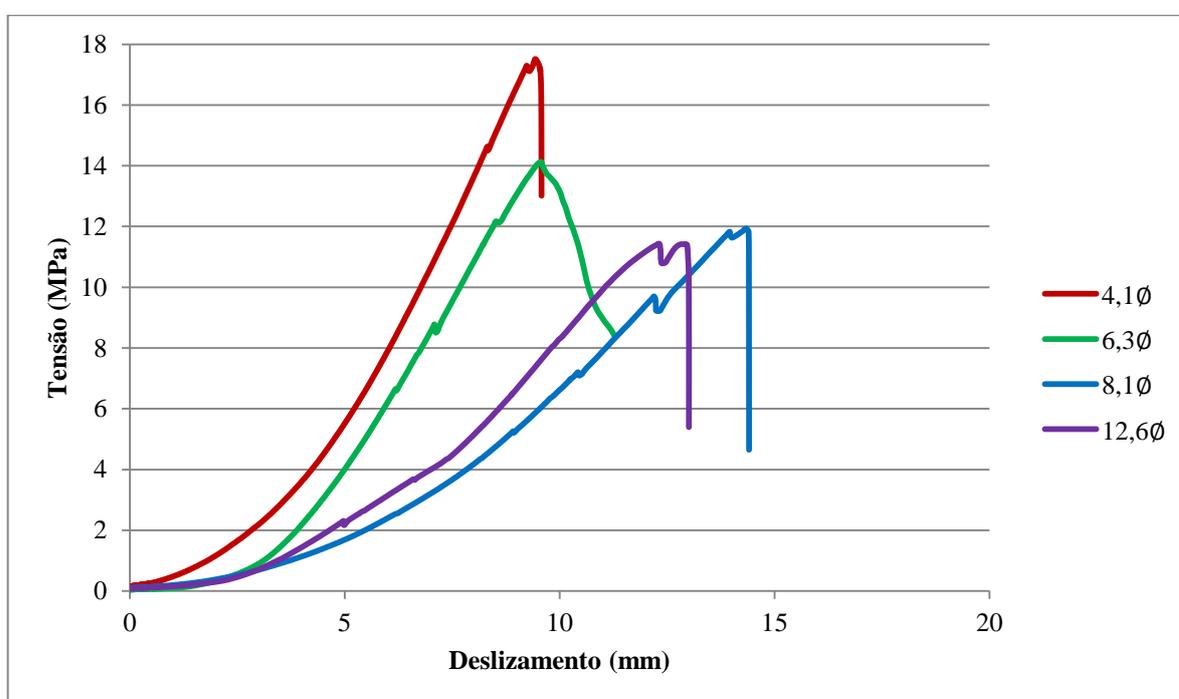


Gráfico 10 - Comparativo de curvas tensão *versus* deslizamento de diferentes comprimentos de aderência

Fonte: A Autora (2014)

5.3.1. Análise Visual dos Corpos de Prova Ensaçados

Após execução do ensaio Apulot, nos corpos de prova da segunda moldagem, realizou-se uma investigação visual com a finalidade de identificar o modo de falha ocorrido em cada um. Observou-se que em 100% dos corpos de prova houve deslizamento da barra de

aço, da maneira ilustrada na figura 21. Segundo Tassios (1979) citado por Rossi (2002), o deslizamento ocorre devido às diferentes propriedades físicas (deformações, por exemplo) existentes entre os materiais. Além disso, pode-se dizer que ocorrendo deslizamento, a aderência por adesão foi rompida.



Figura 20 – Arrancamento da barra de aço pelo fenômeno de deslizamento
Fonte: A Autora (2014)

De acordo com Fusco (1995) a ligação dos materiais aço e concreto mobiliza tensões diagonais de compressão, acompanhadas de tensões transversais de tração para que se atinja o equilíbrio. Tais tensões de tração originam uma região fissurada no concreto, no entorno das barras de aço através da transferência de esforços por aderência as quais coincidem com a tensão τ_{bA} do modelo de Tassios (1979 *apud* ROSSI, 2002). Esse fenômeno, apresentado na figura 22, também foi observado em 100% dos corpos de prova.



Figura 21 – Região fissurada do concreto em decorrência da transferência de esforços por aderência
Fonte: A Autora (2014)

Apesar dos fenômenos apresentados acima serem considerados modos de falha, a aderência não é destruída somente por esses processos, pois os esforços de tração transversais mobilizados pela aderência tendem a provocar o fendilhamento do concreto paralelamente ao eixo da barra de aço (FUSCO, 1995).

Ao realizar a análise visual, identificou-se em 75% dos corpos de prova o fendilhamento do concreto (figura 23), excluindo apenas os confeccionados com barras de 10 mm e menor comprimento de aderência ($6,3\phi$).



Figura 22 – Fendilhamento do concreto em virtude dos esforços de tração transversais
Fonte: A Autora (2014)

Valendo-se do modelo de Tassios (1979, *apud* ROSSI 2002) pode-se concluir que os corpos de prova de diâmetro 10 mm e comprimento de aderência de $6,3\phi$ se comportaram como barras lisas, ou seja, atingiu-se a máxima tensão de aderência entre aço-concreto no nível de tensão τ_{bB} . Todos os outros extrapolaram a tensão τ_{bB} e houve rompimento do concreto por fendilhamento. Acredita-se que de fato ocorreu a arrebentação do concreto, mencionada pelo autor, por fendilhamento, porém como os corpos de prova se mantiveram no invólucro PET, esse fenômeno não pode ser observado e o carregamento continuou sendo aplicado, até que ocorresse a destruição total da aderência.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta inicial do presente trabalho era o desenvolvimento em laboratório do ensaio de arrancamento modificado (Apulot), utilizando garrafas PET como moldes para os corpos de prova, visando estimativa da resistência à compressão do concreto com a finalidade de controle de qualidade em obras de concreto armado.

Além disso, objetivava-se elaborar um dispositivo que possibilitasse a execução dos testes em máquina universal de ensaios, executá-lo com diferentes comprimentos de aderência e em barras de diâmetros distintos de modo a verificar a influência do comprimento de aderência na estimativa da resistência à compressão e identificar as dificuldades e particularidades da realização e implementação do teste.

Para tanto, inicialmente se fez um levantamento do estado da arte, a fim de se familiarizar com o problema e então estabelecer a metodologia a ser seguida.

Na metodologia além de serem definidos os materiais, parâmetros/método de dosagem do concreto, e métodos de concretagem dos moldes e execução dos ensaios, foram delimitados os comprimentos de aderência a serem avaliados.

Estipulou-se que quatro comprimentos de aderência seriam avaliados (dois para cada diâmetro de barra), e seus valores foram obtidos partindo-se da hipótese de que era possível estabelecer o carregamento no qual haveria rompimento da aderência, e a partir deste, utilizando-se de resultados de pesquisas anteriores, se determinava o valor do comprimento. Ao executar os ensaios verificou-se que essa hipótese nem sempre é verdadeira, uma vez que os valores atingidos para força/tensão de arrancamento foram diferentes na maioria dos pontos estudados.

Além disso, acreditava-se que independente do comprimento de aderência, para um mesmo nível de resistência à compressão do concreto, os resultados convergiriam, pois a medida que a área de contato aumentaria, a força de arrancamento também aumentaria, mantendo a tensão de aderência e conseqüentemente, a resistência à compressão estimada sempre constantes. Porém, o que se constatou nos resultados dessa pesquisa, foi que para diferentes comprimentos de aderência, têm-se diferentes tensões de aderência, de modo que as mesmas diminuem à medida que os comprimentos de aderência assumem maior valor.

Ao confrontar os resultados encontrados com a literatura, o concreto de classe 38,23 MPa apresentou melhores resultados nos menores comprimentos de aderência, tanto na barra de 10 mm quanto na barra de 12,5 mm. Já para o concreto C25 o resultado mais satisfatório

foi observado em um valor intermediário. Diante desse fato, conclui-se que o controle da resistência do concreto pode ser feito por meio do método Apulot, desde que seja avaliada essa relação entre comprimento de aderência e resistência estimada, de modo a se definir o melhor comprimento de aderência a ser adotado para cada classe de concreto.

Para compreender ainda melhor como o comprimento de aderência afeta a resistência estimada, propõe-se que em trabalhos futuros sejam avaliados diferentes comprimentos de aderência e diâmetros de barras através das áreas de contato, além de realizar o ensaio em canteiro de obra de modo a verificar se ocorre o mesmo comportamento, mesmo utilizando-se de outro equipamento.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA FILHO, Fernando M. de. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis**. 2006. 310p. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 6p.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 14p.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 221p.

_____. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000, 11p.

_____. **NBR NM 45: Agregado – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006, 18p.

_____. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 8p.

_____. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 6p.

BARBOSA, Mônica P.; PEREIRA João B.; LORRAIN, Michel. Análise experimental e avaliação da influência da resistência à compressão do concreto no ensaio de aderência APULOT. Gramado. Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto, Outubro 2013.

BRANDÃO, Ana Maria S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado – aspectos relativos ao projeto**. 1998. 149f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BRANDÃO, Ana Maria S.; PINHEIRO, Libânio M. Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, n.8, p 1-25, 1999.

CAMARGO CORRÊA. **Briefing Ciclo do Concreto**. São Paulo, SP, 2013, 21p.

DUCATTI, Vitor A. **Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura**. 1993. 25f. Resumo Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

FERNANDES, Rejane M. **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto**. 2000. 172f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

FRANÇA, Valério H. **Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

FUSCO, Péricles B. **Estruturas de concreto**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976.

FUSCO, Péricles B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1995.

GASPARETO, Karine; BARBOSA, Mônica P.; LORRAIN, Michel. Aplicação e avaliação do ensaio de APULOT em canteiros de obras de pequeno e médio porte. Gramado. Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto, Outubro 2013.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas S.A, 2002.

LEONHARDT, Fritz; MÖNNING Eduard. **Construções de concreto**. Volume 1. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.

LIMA, Paulo G. **Tendências paradigmáticas na pesquisa educacional**. 2001. 317f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

LORRAIN, Michel; BARBOSA, Mônica, P.; SILVA FILHO, Luiz C. Estimativa da resistência à compressão a partir de resultados de ensaios de aderência tipo *Pull-Out* para controle da qualidade do concreto na obra. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. São Paulo, v.4, n.4, p582-591, outubro 2011.

LORRAIN Michel; BARBOSA, Mônica, P. Controle de qualidade dos concretos estruturais e ensaio de aderência aço-concreto. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. São Paulo, n.51, p52-57, 2008.

OLIVEIRA, Paulo V. S. **Estudo da aderência aço-concreto: ensaio de tirantes**. 2011. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2011.

ROSSI, Nelson. **Resistência de aderência concreto-aço: efeitos da resistência à compressão do concreto e do comprimento de aderência**. 2002, 196f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

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

SILVA, Bruno do V.; BARBOSA, Mônica P.; SILVA FILHO, Luiz C.; LORRAIN, Michel. Investigação experimental sobre o uso de ensaios de aderência aço-concreto para estimativa de resistência à compressão axial do concreto: Parte 1. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. São Paulo, v.6, n.5, p715-736, outubro 2013.

TAVARES, Alysson J. **Aderência aço-concreto: análise numérica dos ensaios *pull-out* e *Apulot***. 2012. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

APÊNDICE A
Parâmetros de Dosagem (Método ABCP/ACI)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO

A análise granulométrica da areia natural foi feita seguindo instruções da NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Na tabela A.1 são exibidos os valores encontrados.

Tabela A. 1– Análise granulométrica areia natural

| Peneiras # (mm) | Amostra 1 | | | Amostra 2 | | | Média | |
|--------------------|------------------------|-------------|-----------------------|------------------------|---------|----------------------|-------------|-----------------------|
| | Massa Retida (g) | % Retida | % Retida Acumulada | Massa Retida (g) | %Retida | %Retida Acumulada | % Retida | % Retida Acumulada |
| 6,3 | 5,83 | 0,57 | 0,57 | 4,70 | 0,46 | 0,46 | 0,52 | 0,52 |
| 4,8 | 13,66 | 1,34 | 1,91 | 12,14 | 1,19 | 1,65 | 1,26 | 1,78 |
| 2,4 | 59,26 | 5,80 | 7,71 | 62,25 | 6,09 | 7,74 | 5,95 | 7,72 |
| 1,2 | 101,86 | 9,97 | 17,68 | 105,98 | 10,37 | 18,11 | 10,17 | 17,89 |
| 0,6 | 131,65 | 12,89 | 30,57 | 132,98 | 13,01 | 31,12 | 12,95 | 30,84 |
| 0,3 | 438,87 | 42,96 | 73,53 | 443,64 | 43,41 | 74,53 | 43,19 | 74,03 |
| 0,15 | 241,93 | 23,68 | 97,21 | 232,28 | 22,73 | 97,26 | 23,21 | 97,24 |
| 0,075 | 22,91 | 2,24 | 99,46 | 21,01 | 2,06 | 99,31 | 2,15 | 99,38 |
| Fundo | 5,56 | 0,54 | 100,00 | 7,02 | ,069 | 100,00 | 0,62 | 100,00 |

Fonte: A Autora (2014)

O módulo de finura é definido como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras da série normal (75 mm; 37,5 mm; 19 mm; 9,5 mm; 4,75 mm; 2,46 mm; 1,18 mm; 600 µm; 300 µm e 150 µm) sobre 100. Deste modo, tem-se que o módulo de finura da areia utilizada é de 2,295.

Dimensão máxima característica é uma grandeza definida como a abertura nominal (em mm) da malha da peneira na qual o agregado apresenta porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Assim, para o agregado ensaiado, o diâmetro máximo característico é 4,8 mm.

MASSA UNITÁRIA

Para determinação da massa unitária da areia, a NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios norteou o ensaio. Utilizou-se do “método A”, uma vez que o agregado ensaiado era miúdo e este apresenta dimensão máxima característica inferior a 37,5mm e os resultados encontrados estão na tabela A.2.

Tabela A. 2 – Massa unitária areia natural

| Amostra | Massa (g) | Volume (cm ³) | Massa Unitária (g/cm ³) |
|--------------|-----------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 4376,5 | 2769,5 | 1,580 |
| 2 | 4374,5 | 2769,5 | 1,580 |
| 3 | 4369,5 | 2769,5 | 1,578 |
| Média | | | 1,579 |

Fonte: A Autora (2014)

Na determinação da massa unitária do agregado graúdo (brita) foram utilizados os mesmos procedimentos da massa unitária da areia (tabela A.3).

Tabela A. 3 – Massa unitária brita

| Amostra | Massa (g) | Volume (cm ³) | Massa Unitária (g/cm ³) |
|--------------|-----------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 11159,0 | 6698,5 | 1,666 |
| 2 | 11161,0 | 6699,0 | 1,666 |
| Média | | | 1,666 |

Fonte: A Autora (2014)

MASSA ESPECÍFICA

O ensaio para determinação da massa específica do agregado graúdo foi guiado pela NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, cujos valores são apresentados na tabela A.4.

Tabela A. 4 – Massa específica agregado graúdo

| | |
|--|---------|
| Massa Saturada Superfície Seca (g) | 5700,00 |
| Massa em Água (g) | 3722,5 |
| Massa Seca (g) | 5588,0 |
| Massa Específica (g/cm³) | 2,826 |

Fonte: A Autora (2014)

Na determinação da massa específica do agregado miúdo utilizou-se do método do picnômetro, que embora não seja normalizado, fornece o valor com grande rapidez e precisão. Seu valor é conforme exposto na tabela A.5.

Tabela A. 5 – Massa específica agregado miúdo

| Amostra | Areia Natural (g) | Picnômetro+Água (g) | Picnômetro+Água+Areia (g) | Massa Específica (g/cm ³) |
|---------------|-------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 200,00 | 612,53 | 736,67 | 2,636 |
| 2 | 195,42 | 612,81 | 734,02 | 2,633 |
| 3 | 205,36 | 612,63 | 740,48 | 2,649 |
| Média: | | | | 2,640 |

Fonte: A Autora (2014)

O cimento escolhido para realização desta pesquisa foi o CP II Z 32, o qual apresenta nível de resistência aos 28 dias de 32MPa.

Realizou-se o ensaio de massa específica do cimento de acordo com a NBR NM 23 – Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (tabela A.6).

Tabela A. 6 – Massa específica do cimento

| Amostra | Leitura 1 (cm³) | Leitura 2 (cm³) | Massa (g) | Massa Específica (g/cm³) |
|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|--|
| 1 | 0,4 | 18,3 | 48,76 | 2,724 |
| 2 | 0,6 | 18,5 | 48,73 | 2,722 |
| | | | Média | 2,723 |

Fonte: A Autora (2014)

APÊNDICE B
Ensaio à Compressão Axial (NBR 5739)

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão dos 9 corpos de prova que foram confeccionados na primeira moldagem são apresentados na tabela B.1.

Tabela B. 1 - Resistência à compressão axial – 1ª Moldagem

| CP | Idade (dias) | Carregamento (tf) | Resistência à Compressão (MPa) |
|----|--------------|-------------------|--------------------------------|
| 1 | 16 | 17 | 21,6 |
| 2 | 16 | 16 | 20,4 |
| 3 | 16 | 17 | 21,6 |
| 4 | 20 | 16 | 20,4 |
| 5 | 20 | 19 | 24,2 |
| 6 | 20 | 16 | 20,4 |
| 7 | 24 | 21 | 26,7 |
| 8 | 24 | 25 | 31,8 |
| 9 | 24 | 26 | 33,1 |

Fonte: A Autora (2014)

Na segunda moldagem os corpos de prova foram produzidos no dia 11/06/2014 e suas idades foram contadas a partir desta data. Os valores obtidos para resistência à compressão nas diferentes idades encontram-se na tabela B.2.

Tabela B. 2 – Resistência à compressão axial – 2ª Moldagem

| CP | Idade (dias) | Carregamento (tf) | Resistência à Compressão (MPa) |
|----|--------------|-------------------|--------------------------------|
| 1 | 3 | 12,0 | 15,3 |
| 2 | 3 | 12,0 | 15,3 |
| 3 | 3 | 13,0 | 16,3 |
| 4 | 7 | 16,5 | 21,0 |
| 5 | 7 | 15,2 | 19,3 |
| 6 | 7 | 17,0 | 21,6 |
| 7 | 12 | 19,0 | 24,2 |
| 8 | 12 | 20,7 | 26,3 |
| 9 | 12 | 18,8 | 23,9 |
| 10 | 16 | 23,1 | 29,4 |
| 11 | 16 | 20,8 | 26,5 |
| 12 | 16 | 19,3 | 24,6 |

Fonte: A Autora (2014)

APÊNDICE C
Resultados Ensaio Apulots

Os valores encontrados no ensaio Apulot para os CPs feitos na primeira moldagem são mostrados na tabela C.1:

Tabela C. 1 – Resultados dos ensaios Apulots – 1ª Moldagem

| \emptyset (mm) | Comprimento de Aderência | Força Máxima (kN) | Tensão Máxima (MPa) | Resistência à Compressão Estimada (MPa) |
|---------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------|--|
| 12,5 | 4,1 \emptyset | 36,070 | 17,922 | 41,127 |
| 12,5 | 4,1 \emptyset | 36,060 | 17,917 | 41,112 |
| 12,5 | 4,1 \emptyset | 36,100 | 17,653 | 40,313 |
| 10,0 | 6,3 \emptyset | 35,061 | 17,715 | 40,499 |
| 10,0 | 6,3 \emptyset | 38,597 | 19,501 | 45,913 |
| 10,0 | 6,3 \emptyset | 29,677 | 14,994 | 32,255 |
| 12,5 | 8,1 \emptyset | 64,398 | 16,196 | 35,898 |
| 12,5 | 8,1 \emptyset | 61,731 | 15,526 | 33,865 |
| 12,5 | 8,1 \emptyset | * | * | * |
| 10,0 | 12,6 \emptyset | 50,763 | 12,824 | 25,679 |
| 10,0 | 12,6 \emptyset | 51,872 | 13,104 | 26,528 |
| 10,0 | 12,6 \emptyset | * | * | * |

Fonte: A Autora (2014)

Observa-se que 1 corpo de prova de 8,1 \emptyset e 1 de 12,6 \emptyset não apresentaram resultado. Isso ocorreu pelo fato de que no momento do ensaio houve desligamento da máquina, de modo que foram perdidos os dados de ambos.

Na tabela C.2 são apresentados os valores encontrados para os 3 corpos de prova de cada comprimento de aderência, da segunda moldagem.

Tabela C. 2 - Resultados dos ensaios Apulots – 2ª Moldagem

| \emptyset (mm) | Comprimento de Aderência | Força Máxima (kN) | Tensão Máxima (MPa) | Resistência à Compressão Estimada (MPa) | Deformação (mm) |
|---------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|--|--------------------|
| 12,5 | 4,1 \emptyset | 35,081 | 17,516 | 39,898 | 9,577 |
| 12,5 | 4,1 \emptyset | 35,270 | 17,611 | 40,184 | 10,989 |
| 12,5 | 4,1 \emptyset | 33,443 | 16,698 | 37,419 | 16,200 |
| 10,0 | 6,3 \emptyset | 27,959 | 14,126 | 29,625 | 11,272 |
| 10,0 | 6,3 \emptyset | 25,192 | 12,728 | 25,389 | 12,830 |
| 10,0 | 6,3 \emptyset | 26,650 | 13,465 | 27,621 | 16,345 |
| 12,5 | 8,1 \emptyset | 47,337 | 11,935 | 14,405 | 14,405 |
| 12,5 | 8,1 \emptyset | 50,653 | 12,771 | 13,894 | 13,894 |
| 12,5 | 8,1 \emptyset | 49,894 | 12,580 | 18,023 | 18,023 |
| 10,0 | 12,6 \emptyset | 45,239 | 11,429 | 21,450 | 13,005 |
| 10,0 | 12,6 \emptyset | 48,286 | 12,198 | 23,783 | 18,227 |
| 10,0 | 12,6 \emptyset | 36,040 | 9,105 | 14,408 | 14,670 |

Fonte: A Autora (2014)

O gráfico C.1 representa a curva de resistência estimada para todos os corpos de prova das moldagens 1 e 2.

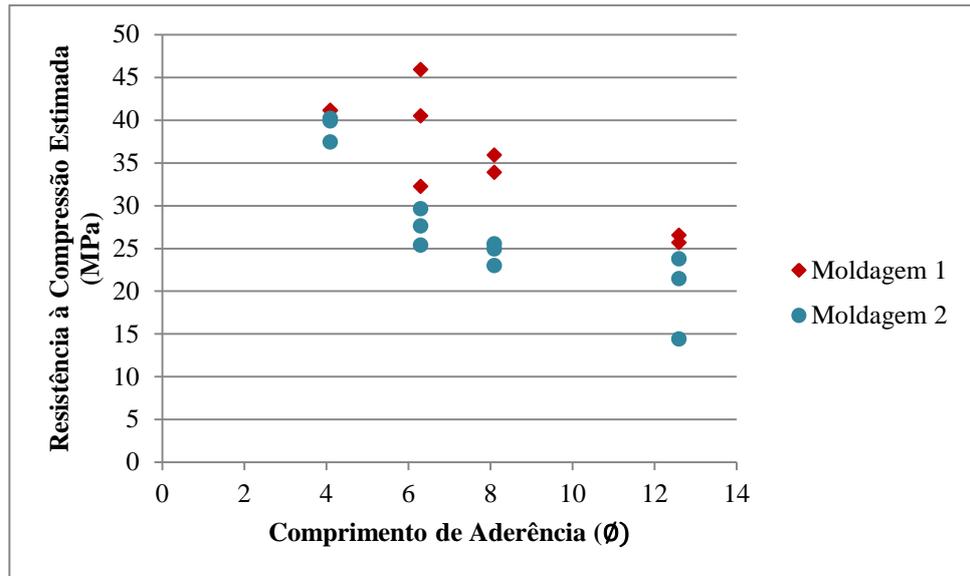


Gráfico C. 1 – Resistência à Compressão Estimada Através do Ensaio Apulot
Fonte: A Autora (2014)