



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil– PROPEC

---



**Bárbara Héllen Rodrigues**

**ESTUDO DA ADERÊNCIA AO AÇO DOS CONCRETOS  
CONVENCIONAL, LEVE E COM AR INCORPORADO EM  
SEÇÕES MISTAS DE PERFIS TUBULARES**

**Ouro Preto  
Maio de 2016**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil– PROPEC

---



Bárbara Héllen Rodrigues

## **ESTUDO DA ADERÊNCIA AO AÇO DOS CONCRETOS CONVENCIONAL, LEVE E COM AR INCORPORADO EM SEÇÕES MISTAS DE PERFIS TUBULARES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Arlene Maria Cunha Sarmanho

Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

**Ouro Preto  
Maio de 2016**

R696e      Rodrigues, Bárbara Héllen.  
Estudo da aderência ao aço dos concretos convencional, leve e com ar incorporado em seções mistas de perfis tubulares [manuscrito] / Bárbara Héllen Rodrigues. - 2016.  
54f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho.  
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

Area de Concentração: Construção Metálica / Estruturas.

1. Aço tubular - Estruturas. 2. Estruturas metálicas. 3. Adesivos. I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. II. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

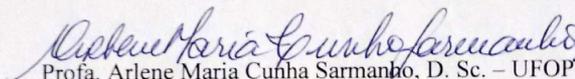
CDU: 624.016

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)

**ESTUDO DA ADERÊNCIA AO AÇO DOS CONCRETOS  
CONVENCIONAL, LEVE E COM AR INCORPORADO EM SEÇÕES  
MISTAS DE PERFIS TUBULARES**

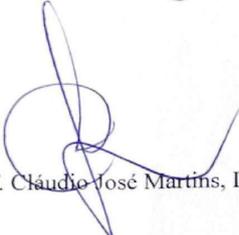
**AUTOR: BÁRBARA HÉLLEN RODRIGUES**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 30 de maio de 2016, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

  
Prof.ª Arlene Maria Cunha Sarmento, D. Sc. – UFOP (Presidente)

  
Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, D. Sc. – UFOP

  
Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. - IFMG

  
Prof. Cláudio José Martins, D. Sc. – CEFET-MG

*Dedico este trabalho aos meus amados pais e irmãos, a minha linda afilhada Lara e ao meu querido noivo Samuel.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu melhor amigo, Deus. Obrigada por guiar meus passos e nunca desistir de mim.

Aos meus amados pais Henrique e Geralda, agradeço pelo imenso amor, dedicação, apoio, palavras de conforto e carinho sempre que preciso. Obrigada por serem meus primeiros professores, me ensinaram a ter humildade em todos os momentos da vida.

Aos meus queridos irmãos Alexandre, Félix, Cássia e Luiz Henrique agradeço pela amizade, amor, paciência, apoio e companheirismo. E à minha querida afilhada Lara, por alegrar todos os meus dias, mesmo à distância! Obrigada por entenderem minha ausência em muitos momentos e por me incentivarem a continuar firme.

Ao meu noivo Samuel, que é meu amor, meu grande amigo e meu príncipe, eu agradeço imensamente por todo amor, companheirismo, paciência, cuidado, conselhos e incentivo. Obrigada meu bem, por não medir esforços para estar ao meu lado e me encorajar!

À minha querida avó "Vovoguete" Mariinha, à querida Tia-mainha Dita, à D. Irene e Tia Maria Eterna por todo o amor, conversas e carinho. Agradeço ao saudoso Tio-painho Ivo, por ter me ensinado o quanto vale a pena viver, ser forte, não desistir e lutar até o fim. A todos da minha família e meus amigos que sempre rezaram e torceram por mim, muito obrigada!

Em especial, agradeço à minha querida amiga Deh, que mesmo com toda a distância que agora nos separa, esteve muito presente, principalmente na reta final, me dando muito apoio, me encorajando e rezando.

À Profa. Dr<sup>a</sup>. Arlene Sarmanho e ao Prof. Dr. Ricardo Fiorotti por me orientarem sempre com muita paciência e educação. Agradeço também por terem sido compreensivos e acolhedores nos momentos que precisei.

Aos amigos do laboratório, em especial ao Júnio e Gilney, agradeço por sempre me ajudarem quando precisei na etapa experimental, sempre com muita boa vontade. Aos funcionários e aos professores do mestrado.

Aos amigos e colegas do Propec, em especial aos amigos Lucas Roquete, Luiza Carvalho, Marina Dutra, Wagner Cavallare e Luma Dias.

À Faculdade do Futuro de Manhuaçu, agradeço pela oportunidade profissional. Em especial ao Carlos Augusto e Márcio Campos, agradeço pelas conversas de apoio e por toda compreensão.

Aos amigos de Ouro Preto, em especial aos amigos e irmãos na fé do Grupo de Oração Universitário – GOU, em especial ao Luan Carlos e Letícia, ao Grupo Nossa Senhora de Lourdes, à República Tabor e República Grande Família que se tornaram minha família em Ouro Preto. Agradeço imensamente por todos os momentos de oração, partilhas e descontração. Ao Pe. Danival, agradeço de todo coração pelo direcionamento espiritual, oração e amizade.

À Capes pelo apoio financeiro.

A todos que me ajudaram de alguma maneira. Muito obrigada!

***"Cada um tem o que espera.  
Confie em Deus e você já terá muito!"  
(SÃO PADRE PIO DE PIETRELCINA)***

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS .....	xi
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo Geral .....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.2. Justificativa .....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Aço.....	4
2.1.1. Perfil tubular de aço formado a frio.....	4
2.2. Concreto.....	6
2.3. Estruturas mistas .....	11
2.4. Aderência em Pilares Mistos Aço-Concreto.....	14
MATERIAIS E MÉTODOS .....	19
3.1 Materiais .....	19
3.1.1 Aço.....	19
3.1.2 Concreto.....	20
3.2 Métodos .....	23
3.2.1. Corte do perfil tubular fino de aço.....	23
3.2.2. Dosagem dos concretos .....	23
3.2.3. Perfil Tubular Misto Aço-Concreto.....	25
TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO.....	27
4.1. Caracterização dos agregados.....	27
4.2. Caracterização do concreto no estado fresco.....	27
4.3. Caracterização do concreto no estado endurecido.....	28
4.3.1. Absorção de água, índice de vazios e massa específica .....	30
4.3.2. Resistência a compressão simples .....	30
4.3.3. Módulo de elasticidade .....	31

4.4. Caracterização dos protótipos mistos .....	33
4.4.1. Análise da aderência entre os componentes .....	33
4.4.2. Microscopia Ótica.....	35
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
5.1 Caracterização dos agregados .....	36
5.1.1. Massa específica e Massa unitária .....	36
5.1.3. Módulo de finura e Dimensão máxima do agregado.....	37
5.2. Caracterização do concreto no estado fresco .....	38
5.2.1. Ensaio de abatimento do tronco de cone .....	38
5.3. Caracterização do concreto no estado endurecido.....	39
5.3.1. Absorção de água por imersão e índice de vazios .....	39
5.3.2. Massa específica .....	41
5.2.4. Módulo de elasticidade .....	42
5.2.5. Resistência à compressão .....	42
5.3. Caracterização dos protótipos mistos .....	44
5.3.1. Análise da aderência entre os componentes .....	44
5.3.2. Microscopia Ótica.....	48
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cobertura do aeroporto de Hamburgo, Alemanha (V&M DO BRASIL, 2008)....	5
Figura 2.2 – Vigas de concreto pré-moldado sendo instaladas no Skyway Segment, ponte que liga as cidades de Oakland e San Francisco, California, EUA (METHA & MONTEIRO, 2014).....	6
Figura 2.3 – Aspecto da argila expandida brasileira (Tipo 2215) produzida pela empresa Cinexpan (CINEXPAN, 2016).....	8
Figura 2.4 - Relação de teor de ar e resistência do concreto (NEVILLE, 1982). ....	10
Figura 2.5 - Módulo de elasticidade estático.....	11
Figura 2.6 – Fotografias do edifício Two Union Square, Seattle, Washington, EUA. (a) construção e (b) edifício totalmente concluído. ....	12
Figura 2.7 – Tipos de pilares mistos aço-concreto. (a) Perfil I de aço revestido parcialmente por concreto, (b) perfil I totalmente revestido por concreto, (c) perfil tubular de aço, de diferentes seções transversais, preenchido de concreto (OLIVEIRA, 2008). ....	13
Figura 2.8 – Mecanismos de transferência da aderência natural (JOHANSSON & GYLLTOFT, 2002). ....	14
Figura 2.9 – Componentes das ações de cálculo e propriedades geométricas para o cálculo da tensão de cisalhamento na interface (JOHANSSON, 2003). ....	17
Figura 3.1 – Dimensões dos tubos de aço utilizados no trabalho. ....	20
Figura 3.2 - Fluxograma do processo de obtenção do traço dos concretos.....	25
Figura 3.3 - Representação esquemática do perfil tubular misto. ....	26
Figura 4.1- Análise da consistência do concreto pelo abatimento de tronco de cone.....	28
Figura 4.2 - Corpos de prova capeados com enxofre.....	29
Figura 4.3 - Conjunto PC-200 e DL 20000-EMIC.....	29
Figura 4.4 - Ensaio de módulo de elasticidade estático. ....	31
Figura 4.5 - Datalogger Agilent 34972A. ....	32
Figura 4.6 – Método da tensão fixa.....	32
Figura 4.7 - Representação esquemática da instrumentação dos protótipos.....	34
Figura 4.8 - (a) Instrumentação para o ensaio de aderência dos protótipos, (b) detalhe do deflectômetro eletrônico.....	35
Figura 5.1 - Massa específica e massa unitária dos agregados. ....	36
Figura 5.2 - Absorção de água por imersão e índice de vazios.....	39

Figura 5.3 - Massas específicas dos concretos.....	41
Figura 5.4 - Módulo de elasticidade dos concretos.....	42
Figura 5.5 - Resistência à compressão dos concretos.....	43
Figura 5.6 - Representação gráfica das médias dos resultados do ensaio de carga aplicada no núcleo de concreto dos protótipos.....	45
Figura 5.7 - Gráficos força x deslocamento para os protótipos (a)PCC, (b)PCL e (c)PCAI..	46
Figura 5.8 - Imagens de microscopia ótica das amostras do PSC, com aumentos de (a)10x e (b)45x.....	48
Figura 5.9 - Imagens de microscopia ótica das amostras do PCC, com aumentos de (a)10x e (b)45x.....	48
Figura 5.10 - Imagens de microscopia ótica das amostras do PCAI, com aumentos de (a)10x e (b)45x.....	49
Figura 5.11 - Imagens de microscopia ótica das amostras do PCL, com aumentos de (a)10x e (b)45x.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos agregados segundo a massa unitária (METHA & MONTEIRO, 2014).....	7
Tabela 2.2 – Características das argilas produzidas pela empresa Cinexpan (CINEXPAN, 2016).....	9
Tabela 2.3 – Tensão de cisalhamento resistente de cálculo $\tau_{Rd}$ (ABNT NBR 8800:2008).....	18
Tabela 3.1 – Materiais utilizados nos concretos .....	21
Tabela 3.2 – Exigências físicas, mecânicas e químicas do CPIII-40 (ABNT NBR 5735:1991). .....	21
Tabela 3.3 - Características dos aditivos.....	23
Tabela 3.4 – Traços calculados para o CC, CL e CAI.....	24
Tabela 4.1 - Nomenclatura e características dos protótipos para o ensaio de aderência.....	33
Tabela 5.1 - Módulo de finura e Dimensão máxima característica dos agregados.....	37
Tabela 5.2 - Abatimento tronco de cone .....	38
Tabela 5.3 - Resultados do ensaio de carga aplicada no núcleo de concreto dos protótipos...	44

## **LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ABCP - Associação Brasileira de cimento Portland  
CC – Concreto leve  
CL – Concreto convencional  
CAI – Concreto com ar incorporado  
CP – Corpo de prova  
NBR - Norma Brasileira  
UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto  
PSC - Protótipo sem concreto  
PCC - Protótipo misto com concreto convencional  
PCL - Protótipo misto com concreto leve  
PCAI - Protótipo misto com concreto com ar incorporado

## RESUMO

Nas últimas décadas, a construção civil mundial, de forma geral, vem exigindo o desenvolvimento de técnicas e materiais cada vez mais eficientes, de aplicação fácil e rápida, além de um produto final com custos reduzidos. Ao encontro desta demanda a utilização do sistema misto de aço e concreto, no Brasil e no mundo, vem aumentando devido a todas as vantagens oferecidas por este, em relação ao uso isolado de cada material. Frente a este cenário, o presente trabalho propõe a realização de um estudo da aderência de perfis tubulares de aço, preenchidos com diferentes tipos de concreto, para as análises de aderência. Para tanto, foram confeccionados doze protótipos de pilares mistos, utilizando perfis tubulares finos de aço com diâmetro externo de 100 mm, espessura do tubo de 2 mm e comprimento igual a 550mm. Para se permitir o deslocamento do núcleo de concreto durante os testes de compressão, foram deixados vazios, na base e no topo do tubo, ambos com 2 cm de altura. Respeitando-se os vazios, cada tubo foi preenchido com um tipo de concreto, sendo eles os concretos convencional (CC), convencional com adição de aditivo incorporador de ar (CAI) e leve (CL) – este último utilizando argila expandida como agregado. Os concretos produzidos foram submetidos a ensaios de caracterização física, nos estados fresco e endurecido. Os perfis mistos foram submetidos a ensaio de compressão no núcleo de concreto e microscopia ótica do perfil pós-teste de compressão. Assim sendo, os resultados obtidos, a partir das técnicas utilizadas para análise de aderência permitiram concluir que: (i) A aderência do concreto ao aço possui parcelas de contribuição da aderência por adesão e da aderência mecânica, (ii) um menor valor de módulo de elasticidade contribui positivamente para a aderência; (iii) não houve deformação radial nos perfis mistos e por fim, (iv) o perfil tubular preenchido pelo concreto leve apresentou o melhor desempenho em relação a aderência, devido a maior contribuição da aderência mecânica e melhor resistência na interface, que por sua vez, foram ocasionadas pela expansibilidade da argila expandida e menor módulo de elasticidade do concreto.

**Palavras-chave:** Perfil tubular, Estrutura mista e Aderência.

## ABSTRACT

In recent decades, the global construction industry, in general, has required the development of techniques and increasingly efficient materials, quick and easy application, and a final product with reduced costs. To meet this demand using the composite system of steel and concrete in Brazil and in the world, is increasing because of all the advantages offered by this in relation to the individual use of each material. Facing this scenario, this paper proposes a study of the adhesion of thin tubular steel profiles, filled with different types of concrete, to analysis of adherence. Thus, twelve prototypes of composite columns were made using thin tubular steel profiles with external 100mm diameter tube thickness of 2 mm and length of 550mm. To allow the displacement of the concrete core in compression tests were left empty, the base and the top of the tube, both with 2cm height. Respecting empty, each tube was filled with a type of concrete, namely the conventional concrete (CC), with the addition of conventional incorporator air additive (CAI) and light (CL) - the latter using expanded clay as aggregate. The concrete produced were subjected to physical characterization assays in fresh and hardened state. Composites profiles were subjected to compression tests on the concrete core and optical microscopy of the profiled post-test of compression. Therefore, the results obtained from the techniques used for adhesion analysis showed that: (i) the adhesion of concrete to steel own contribution plots of accession for grip and mechanical grip, (ii) lower modulus value elasticity contributes positively to grip; (iii) no radial deformation in mixed profiles and finally, (iv) the tubular profile completed by the lightweight concrete with the best performance in relation to grip due to higher contribution from mechanical grip and better resistance at the interface, which in turn, it were occasioned by the expanded expansion and lower modulus of elasticity of the concrete clay.

**Keywords:** tubular profile, mixed structure and adherence.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A construção civil mundial exige hoje técnicas e materiais cada vez mais eficientes, com aplicação fácil e rápida, além de um produto final com custos menores, tornando-se necessário o desenvolvimento rápido da tecnologia.

Assim, com o desenvolvimento de novas técnicas e produtos, as estruturas metálicas atualmente têm ganhado grande destaque no Brasil e no mundo, levando a um aumento da sua utilização na construção civil. Esse aumento acontece principalmente em grandes edificações e está relacionado a inúmeras vantagens, como rapidez de execução e organização.

Dentre as seções transversais utilizadas na construção civil, existe atualmente uma forte tendência ao uso de perfis tubulares de aço. O uso destes perfis tubulares está em constante crescimento, devido às suas vantagens, como proporcionar soluções mais leves e econômicas.

O concreto, por sua vez, também vem apresentando um crescimento contínuo, tanto em relação a sua aplicação quanto no desenvolvimento de materiais com melhores propriedades, no Brasil e no mundo. Com a necessidade de aumentar a sua resistência à compressão, possibilitando a redução das seções transversais de pilares, conseqüentemente reduzindo o peso próprio e permitindo, assim como os perfis de aço, maiores vãos livres, vem sendo cada vez mais desenvolvidos diferentes tipos de concretos que atendam essa demanda. O dimensionamento de estruturas de concreto, no Brasil, é normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de acordo com a norma NBR 6118:2004.

Com o objetivo de associar as vantagens em relação a resistência e termos construtivos dos perfis de aço e do concreto, surge o emprego de perfis tubulares mistos compostos por estes materiais (FIGUEIREDO, 1998).

Entretanto, em situação de incêndio torna-se necessária a utilização de proteção adicional contra o fogo, uma vez que o aço possui menor resistência ao fogo e à corrosão, em comparação com o concreto (SHANMUGAM & LAKSHMI, 2001).

Por ser um tema de grande interesse para a construção civil, que exige maior resistência das estruturas, obras mais arrojadas e menor tempo de execução, os pilares mistos preenchidos vêm sendo estudados ao longo dos anos por diferentes pesquisadores como: De

Nardim (1999), Roeder et al (1999), Giakoumelis e Lam (2004), da Silva (2006), Almeida (2012).

Dentre todas as características importantes para se ter uma boa avaliação de como se comporta um sistema misto, a análise da aderência entre materiais constituintes é de vital importância, uma vez que as cargas aplicadas no sistema são transferidas entre o tubo de aço e o concreto através da resistência ao cisalhamento longitudinal na interface entre eles ou através de conectores mecânicos, sendo que aderência entre os materiais varia em função do diâmetro do perfil de aço, de sua espessura e do tipo de concreto utilizado no preenchimento.

A fim de levar à compreensão do projeto proposto, bem como os resultados alcançados, a estrutura do presente texto traz no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica abordando os conceitos principais. O Capítulo 3 traz uma breve descrição dos materiais e métodos utilizados para a análise da aderência em tubos circular de aço preenchido de concreto. No Capítulo 4 são descritas as técnicas e os equipamentos utilizados na caracterização dos agregados e aditivos utilizados na produção dos concretos, os ensaios realizados com os concretos no estado fresco e endurecido e também os ensaios realizados nos protótipos mistos para a análise da aderência entre os componentes. O Capítulo 5 apresenta os resultados das caracterizações dos agregados e aditivo, assim como do concreto no estado fresco e endurecido e por fim apresenta os resultados da aderência dos componentes dos protótipos mistos. O Capítulo 6 e 7 trazem as considerações finais e planos futuros do presente projeto.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal determinar tensões de aderência para estruturas de seções mistas em perfis tubulares finos considerando diferentes tipos de concreto.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- ✓ Identificar propriedades de interesse para diferentes tipos de concreto;
- ✓ Determinar o comportamento na interface aço-concreto;
- ✓ Determinar tensões de aderência média para as seções propostas.

## **1.2. Justificativa**

A utilização do sistema misto de aço e concreto, no Brasil e no mundo, ocorre devido a todas as vantagens oferecidas por este, em relação ao uso isolado de cada material. Além de benefícios arquitetônicos e econômicos, o sistema possibilita dispensa de fôrmas, redução do peso próprio da estrutura, aumento da rigidez, entre outros.

Em busca por novas tecnologias, diversas pesquisas são realizadas constantemente em relação a este sistema, sendo o maior alvo de pesquisas o estudo sobre o trabalho conjunto dos perfis tubulares de aço preenchidos com o concreto. A influência da aderência entre os materiais constituintes no comportamento do sistema e na sua resistência, com diversos parâmetros de análise, também é alvo de muitos estudos.

Dentro deste cenário, o presente trabalho propõe a realização de um estudo da aderência de diferentes tipos de concreto ao aço, em seções mistas de perfis tubulares formados a frio, para a avaliação da transferência de tensões entre os dois materiais e análises de resistência. Para tanto, foram utilizados, os concretos convencional, leve e com ar incorporado, com a mesma resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) e os perfis tubulares apresentando mesmo diâmetro, espessura e comprimento. Dessa forma, espera-se que esta pesquisa represente uma contribuição com o desenvolvimento e aplicação de sistemas mistos na construção civil.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados as principais definições, conceitos e características do aço, do concreto, e de perfis tubulares mistos aço-concreto, além das propriedades químicas, físicas e mecânicas dos agregados, somado a uma revisão sobre a aderência entre os componentes da seção mista. Logo este capítulo apresenta todo o embasamento teórico necessário para a compreensão do trabalho.

#### 2.1. Aço

Desde a antiguidade o aço já era um material conhecido, porém sua utilização ocorria em baixíssima escala, quando comparada aos tempos atuais devido a ausência de processos industriais de fabricação. Somente a partir de 1950 houve, de fato, o emprego em grande escala de aços com maior resistência (PFEIL & PFEIL, 2009).

O aço apresenta dentro de suas propriedades mecânicas um módulo de elasticidade, adotado pela norma NBR 8800:2008, no valor de  $E = 200.000 \text{ MPa}$ , bem como o coeficiente de Poisson,  $\nu = 0,3$  e massa específica,  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ .

Com todas essas características apresentadas o aço é inserido como um material de construção, surgindo então as estruturas metálicas que atualmente têm um crescimento constante no mercado brasileiro e mundial. São utilizadas em grandes construções como shoppings, pontes, viadutos e edifícios, tendo aplicabilidade também em construções de médio e pequeno porte.

As vantagens de obter uma execução em tempo reduzido, menos desperdício na obra, boa resistência à tração e compressão, possibilidade de maiores vãos livres, justificam também o aumento do seu uso na construção civil.

##### 2.1.1. Perfil tubular de aço formado a frio

As estruturas metálicas apresentam diversas formas, tipologias e seções, que podem ser, por exemplo, em chapas, barras e perfis. Existindo ainda a possibilidade de se ter perfis

de chapa dobrada e perfil soldado. A aplicação de cada uma das formas citadas depende do uso a que se destina cada projeto (PFEIL & PFEIL, 2009).

Com a necessidade de se obter obras com soluções mais arrojadas, que sejam leves, econômicas e resistentes, o uso de estruturas metálicas com seções transversais tubulares vem apresentando um aumento considerável, nos últimos anos, conforme ilustra a Figura 2.1 que apresenta a cobertura do aeroporto de Hamburgo, na Alemanha.



**Figura 3.1** – Cobertura do aeroporto de Hamburgo, Alemanha (V&M DO BRASIL, 2008).

Os perfis tubulares são aplicados em elementos estruturais que são solicitados por cargas axiais, como colunas, treliças planas e espaciais. Podem ser encontrados com ou sem costura e são classificados quanto ao seu processo de fabricação. Os tubos com costura são produzidos por chapas de aço costuradas e soldadas no seu encontro; já os tubos sem costura são produzidos pelo processo de laminação a quente ou por conformação a frio.

Na construção civil, o uso dos perfis de aço formados a frio vem se tornando cada vez mais viável, devido a rapidez e economia exigida pelo mercado, por serem perfis compostos por chapas finas leves. Além de poder ser muito bem empregado em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, casas populares e edifícios de pequeno porte (Silva *et al*, 2014). O dimensionamento de perfis formados a frio segue a norma NBR 14762:2010 e NBR 6355:2012.

Uma evolução da utilização de perfis tubulares de aço, que atualmente tem sido explorada, é o emprego de perfis tubulares mistos de aço e concreto.

## 2.2. Concreto

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil e isso se deve ao fato de que o concreto apresenta facilidade em obter elementos estruturais de várias formas e tamanhos, como mostra a Figura 2.2, devido sua consistência plástica no estado fresco permitir boa adaptação no interior de fôrmas. E não menos importante, um terceiro motivo de o concreto ser bastante utilizado é o fato de ter um baixo custo e larga disponibilidade de matéria prima. (METHA & MONTEIRO, 2014).



**Figura 3.2** – Vigas de concreto pré-moldado sendo instaladas no Skyway Segment, ponte que liga as cidades de Oakland e San Francisco, California, EUA (METHA & MONTEIRO, 2014).

De forma geral um concreto é composto por cimento Portland, agregados e água, podendo ou não haver a presença de aditivos. As condições requeridas de resistência, trabalhabilidade e durabilidade devem ser atendidas no momento de se definir o traço, ou seja, a proporção entre seus constituintes (NBR 6118:2004).

O volume total dos concretos é composto em grande parte pelos agregados, que diminuem a retração das pastas constituídas por concreto e água e também contribuem para o aumento na resistência mecânica dos concretos, além de exercerem papel importante no custo total do mesmo (RIBEIRO et al, 2002).

Os agregados utilizados no concreto podem ser classificados como grãos ou miúdos, definindo-se grão como pedregulho ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, já o miúdo é definido como areia de origem natural ou resultante do britamento de

rochas estáveis, ou a mistura de ambos (NBR 7211:2009). Algumas características dos agregados, como a sua composição granulométrica, massa unitária, forma e textura superficial, determinam importantes propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Os concretos podem ser classificados como concreto normal, que são os que tem massa específica aparente com valores de 2000 a 2800 kg/m<sup>3</sup>; concreto pesado, com massa específica aparente maior que 2800kg/m<sup>3</sup> e menor que 3800kg/m<sup>3</sup>; e o concreto leve com massa específica aparente menor que 2000kg/m<sup>3</sup> (AGUIAR, 2004 apud PEIXOTO, 2004).

Segundo HAQUE *et al.* (2004), o concreto leve oferece muitos ganhos técnicos, econômicos e ambientais, sendo considerado um material de construção muito versátil. São obtidos pela substituição total ou parcial dos agregados convencionais por agregados leves.

A massa unitária de um agregado é a relação entre a massa e o volume ocupado pelos sólidos e os vazios. A determinação da massa unitária do agregado classifica-os em normais, leves ou pesados, como mostra a Tabela 2.1.

**Tabela 3.1** - Classificação dos agregados segundo a massa unitária (METHA & MONTEIRO, 2014).

<b>Classificação</b>	<b>Massa unitária <math>\gamma</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Exemplos</b>	<b>Principais aplicações</b>
Leves	$\gamma < 1000$	Escória de alto forno, argila expandida, vermiculita	Lajes de pontes, peças pré-moldadas, concretos para isolamento térmico e acústico
Normais	$1000 \leq \gamma \leq 2000$	Areia, brita e pedregulho	Obras em geral
Pesados	$\gamma > 2000$	Barita, linolita, Magnesita	Concretos estruturas para blindagem contra radiações

Segundo NEVILLE (1982), os agregados leves são classificados como naturais ou artificiais. Os leves naturais são as pedra-pomes, cinzas vulcânicas e tufa que são todos de origem vulcânica e o seu uso não é muito difundido. Por sua vez, os agregados leves artificiais são obtidos por tratamento térmico de vários materiais e se classificam quanto à matéria prima utilizada e o processo de fabricação. Como exemplos de agregados leves artificiais têm-se as argilas expandidas, poliestireno, ardósias e escórias de alto-forno (METHA & MONTEIRO, 2014).

No Brasil, a principal produtora de argila expandida é a empresa Cinexpan Argila Expandida, localizada na cidade de Várzea Paulista, São Paulo. A produção da argila expandida ocorre em forno rotativo, utilizando temperaturas de, em média, 1100°C e apresenta formato arredondado regular e núcleo esponjoso, envolto por uma camada vitrificada, como mostra a Figura 2.3. Suas principais características são: leveza, isolamento térmico, baixa densidade, isolamento acústico, durabilidade e resistência a altas temperaturas (ROSSIGNOLO, 2009).



**Figura 3.3** – Aspecto da argila expandida brasileira (Tipo 2215) produzida pela empresa Cinexpan (CINEXPAN, 2016).

A argila expandida tem uma característica importante que é a alta absorção de água, podendo alcançar até 20% de absorção se for mantida por mais de 24 horas imersa (CALIXTO *et al.*, 2001). Segundo a norma NBR 12821:2009, devido a esse alto índice de absorção de água, as argilas expandidas devem ser usadas somente após sua saturação. Na Tabela 2.2, estão representadas as características das argilas expandidas produzidas pela empresa Cinexpan.

Em relação a trabalhabilidade do concreto leve, a sua argamassa é mais pesada que o agregado leve, portanto deve-se ter cuidado com o alto abatimento e a vibração excessiva que podem proporcionar a sedimentação da argamassa. A granulometria do agregado e o fator água/cimento também exercem influência na trabalhabilidade do concreto leve (METHA & MONTEIRO, 2014).

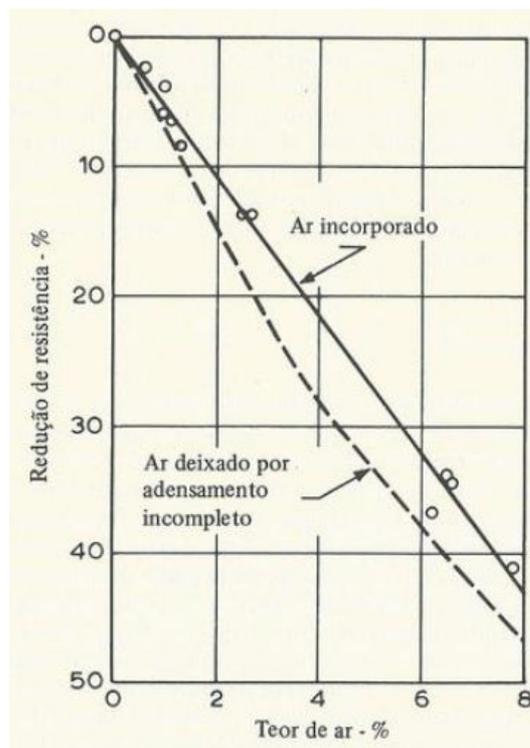
**Tabela 3.2** – Características das argilas produzidas pela empresa Cinexpan (CINEXPAN, 2016).

<b>Classes Granulométricas Nominais</b>	<b>3222</b>	<b>2215</b>	<b>1506</b>	<b>0500</b>	<b>LAM. 2,5</b>
Resistência a compressão por esmagamento (MPa)	6	8	12	20	< 2
Massa volumétrica seca (kg/m <sup>3</sup> )	450	500	600	850	750
Classes granulométricas (mm)	22 - 32	15 - 22	6 - 15	0 - 5	0 - 2,5
Condutibilidade térmica (kcal/(hm°C))	0,11				
Absorção de água por imersão (% em volume 24h)	10	10	7	6	10
Compactabilidade (%)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Resistência ao fogo	Incombustível: classe MO				
Variações ponderáveis em ambientes seco/úmido	Material não higroscópico				
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	0,56	0,64	1,11	1,4	1,51

Segundo PEIXOTO (2004), o concreto leve possui maior resistência à aderência do que o concreto convencional, razão pelo qual as argamassas dosadas para um concreto leve são mais resistentes para uma mesma resistência à compressão.

As características dos concretos podem ter uma melhora em suas características físicas, nos estados fresco e endurecido, com uso de aditivos em sua composição. Os aditivos podem aumentar a plasticidade do concreto sem que seja necessário aumentar o consumo de água, podem diminuir a retração, incorporar microbolhas de ar, controlar a resistência, entre outras finalidades. Existem aditivos que são incorporadores de ar que têm efeito de aumentar a porosidade do concreto na formação de microbolhas de ar na pasta de cimento. (METHA & MONTEIRO, 2014).

A resistência do concreto está baseada na parte sólida do material, portanto os vazios devido à incorporação de ar afetam negativamente a sua resistência. A Figura 2.4 mostra que concretos com mesma proporção de materiais em sua mistura sofrem uma redução na resistência ao incorporar ar. A resistência do concreto, para um teor de ar de 8 %, pode chegar a se reduzir a mais de 40% (NEVILLE, 1982).

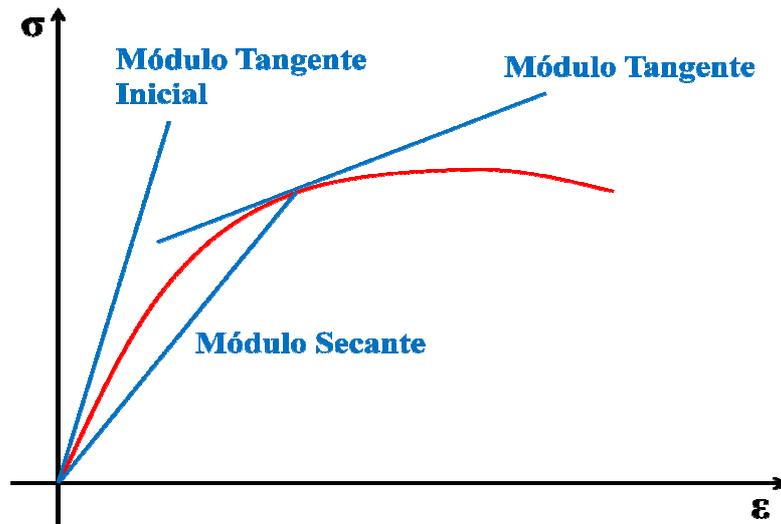


**Figura 3.4** - Relação de teor de ar e resistência do concreto (NEVILLE, 1982).

Segundo KOSMATKA et al (2003), apesar da resistência diminuir com a incorporação de ar, a trabalhabilidade do concreto melhora e isso possibilita uma redução da quantidade de água necessária à mistura, o que leva a um aumento de resistência que compensa em parte a perda ocasionada pela presença dos vazios de ar.

A determinação das propriedades do concreto depende, além das características dos agregados, de ensaios especiais em seu estado fresco e endurecido. O ensaio de compressão, módulo de elasticidade e massa específica são ensaios importantes a se fazer para a caracterização do concreto.

O módulo de elasticidade, por exemplo, é importante, pois está relacionado com a flexibilidade e influi decisivamente no comportamento estrutural. Existem dois tipos de módulo de elasticidade: o módulo de elasticidade estático e o dinâmico. O estático segue a norma NBR 8522:2008 na análise da curva de *tensão x deformação*, representada na Figura 2.5, onde se define o módulo de elasticidade tangencial à origem, o módulo tangente e o módulo secante. Já o módulo de elasticidade dinâmico não é destrutivo e está ligado a alguns aspectos como a análise da qualidade do concreto e espessura de fissuras (PACHECO et al, 2014).



**Figura 3.5 - Módulo de elasticidade estático.**

O módulo de elasticidade do concreto é afetado pela presença de vazios, na mesma proporção em que afeta à resistência à compressão (DOLCH, 1995).

### **2.3. Estruturas mistas**

Os sistemas de estruturas mistas vêm sendo empregados há algumas décadas em diversos países, como Austrália, Alemanha, China, Estados Unidos, Japão, entre outros. Como exemplo, a Figura 2.6 mostra duas imagens do edifício Two Union Square, localizado na cidade de Seattle, Washington, EUA, um edifício que utiliza pilares mistos preenchidos com concreto estrutural (DE NARDIM, 1999).

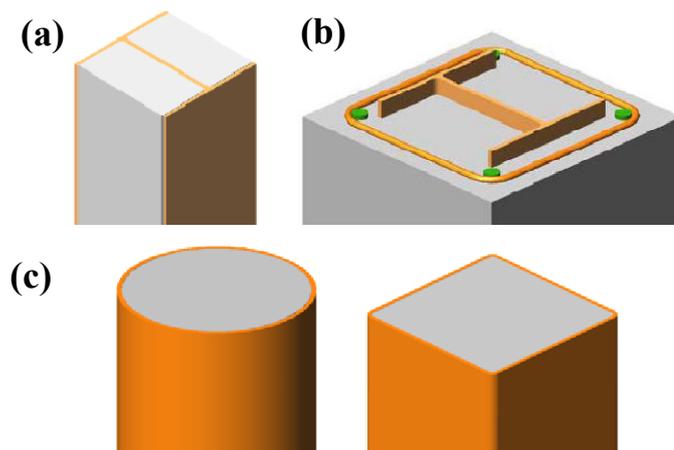


**Figura 3.6** – Fotografias do edifício Two Union Square, Seattle, Washington, EUA. (a) construção e (b) edifício totalmente concluído.

QUEIROZ & PIMENTA (2001), definem um sistema misto de aço-concreto como sendo um sistema formado por um perfil de aço que trabalha juntamente com o concreto, originando pilares, vigas, lajes ou ligações mistas, ocorrendo a interação entre os dois materiais através de conectores mecânicos, atrito ou por simples aderência. Além de apresentar variedade de opções disponíveis e benefícios arquitetônicos e econômicos, esses sistemas mistos apresentam vantagens em relação às outras composições estruturais, tais como:

- ✓ em relação ao concreto armado: tem-se a dispensa de fôrmas e escoramentos, redução do peso próprio e volume da estrutura, aumento da precisão dimensional da construção.
- ✓ em relação ao aço simples: tem-se a redução do consumo de aço estrutural, redução de proteções contra incêndio e corrosão.

Os pilares mistos revestidos, caracterizam-se pelo elemento estrutural em aço ser envolvido parcialmente ou totalmente por concreto, Figura 2.7(a) e 2.7(b), respectivamente. Já os pilares mistos preenchidos, caracterizam-se pelo elemento estrutural em aço de seção tubular ser preenchido por concreto estrutural, Figura 2.7 (c).



**Figura 3.7** – Tipos de pilares mistos aço-concreto. (a) Perfil I de aço revestido parcialmente por concreto, (b) perfil I totalmente revestido por concreto, (c) perfil tubular de aço, de diferentes seções transversais, preenchido de concreto (OLIVEIRA, 2008).

O sistema misto geralmente se apresenta como perfil I de aço revestido parcialmente ou totalmente por concreto e como perfil tubular de aço preenchido de concreto. Ao revestir perfis de aço com concreto, obtém-se o aumento da capacidade resistente da seção de aço, devido à minimização dos fenômenos de flambagem local e global, e ainda a proteção contra incêndio e corrosão. Apesar de existir muitas vantagens no emprego de pilares revestidos, há também alguns contrapontos, como por exemplo o fato de exigir a utilização de fôrmas durante a concretagem e maior atenção no posicionamento e fixação dos perfis e das barras de armadura, ao passo que nos perfis preenchidos, o próprio perfil de aço trabalha como fôrma do concreto no processo de execução, o que minimiza os custos com materiais e mão-de-obra. Em relação ao trabalho conjunto dos dois materiais, estes necessitam de menores quantidades de aço e concreto para resistir a esforços de compressão e momentos fletores (DE NARDIM, 1999).

De acordo com a NBR 8800:2008, o método simplificado de dimensionamento estrutural do sistema misto apresenta as seguintes hipóteses: a existência de interação completa entre o concreto e aço, as imperfeições iniciais são consistentes com aquelas adotadas para a determinação de barras submetidas à compressão axial; e a flambagem local para força axial e momento fletor não pode ser um estado-limite último predominante.

Se tratando de perfis formados a frio, a utilização do sistema misto ainda está em fase inicial, havendo necessidade de mais estudos a respeito. Porém, no Brasil, o emprego do sistema misto composto por perfis formados a frio tem sido impulsionado devido a ampla disponibilidade de aços (CHAVES, 2009).

O tubo de aço trabalha como um reforço transversal que restringe a expansão lateral do núcleo de concreto em pilares mistos preenchidos, o que dá origem ao confinamento.

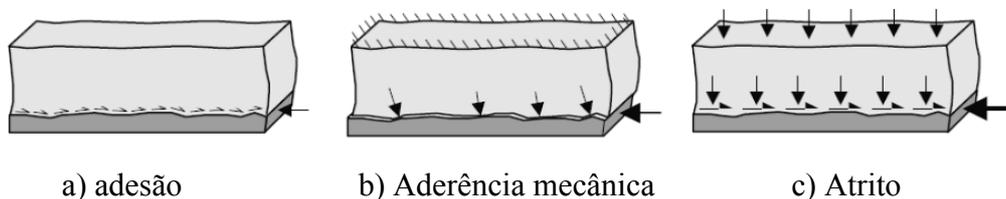
Existem dois tipos de confinamento possíveis em pilares mistos de aço-concreto, o confinamento ativo e o confinamento passivo. O confinamento é dito ativo quando são aplicadas pressões laterais em um cilindro de concreto e, enquanto é aplicada a força axial, essas pressões são mantidas constantes. No caso dos pilares mistos ocorre o confinamento passivo, pois este surge quando o elemento é impedido de se expandir lateralmente quando carregado axialmente (OLIVEIRA, 2008).

BRAGA (2011) faz um comparativo de custo dos pilares mistos em relação aos pilares de aço e concreto armado, avaliando a viabilidade da utilização de pilares mistos para uma racionalização na construção civil, e verifica que os perfis tubulares circulares mistos preenchidos de concreto foram mais econômicos do que os perfis preenchidos quadrados.

#### 2.4. Aderência em Pilares Mistos Aço-Concreto

O comportamento do escorregamento do concreto devido a força aplicada é analisado para investigar como ocorre a transferência de cisalhamento na interface aço-concreto em pilares mistos preenchidos (DA SILVA, 2006).

A aderência natural pode ser dividida em três mecanismos distintos de transferência: a adesão, aderência mecânica e atrito, apresentados na Figura 2.8. Além de poder ser empregado também o uso de dispositivos mecânicos para aumentar a resistência ao escorregamento, dispositivos esses conhecidos como conectores de cisalhamento (OLIVEIRA, 2008).



**Figura 3.8** – Mecanismos de transferência da aderência natural (JOHANSSON & GYLLTOFT, 2002).

A adesão está relacionada à aderência química entre o concreto e o tubo de aço, que se manifesta no início do carregamento, podendo ser desprezada para efeito de resistência (DA SILVA, 2006).

ROEDER *et al.* (1999) mostra que para os pilares mistos na aderência por adesão a transferência de tensões entre o concreto e o aço depende da expansão radial do concreto e dos efeitos de retração. A tensão de aderência não parece ter relação com a resistência do concreto e diminui com o aumento da relação  $D/t$  em função da maior influência de retração. A pesquisa identifica que em pilares mistos de seção circular a aderência é maior se comparada a perfis quadrados. A partir dos resultados é proposta a expressão, descrita na Equação 2.1, para calcular a tensão de aderência entre o concreto e o aço:

$$f_{2\sigma} = 2,109 - 0,026 \times D/t \quad \text{EQ. 2.1}$$

Sendo  $f_{2\sigma}$  a tensão de aderência,  $D$  o diâmetro externo do tubo e  $t$  a espessura do tubo.

A aderência mecânica tem valor importante enquanto as superfícies dos materiais estão em contato. Ela se rompe nos estágios iniciais de carregamento em função do aumento do deslocamento relativo entre os materiais. Porém, a aderência mecânica pode ser considerada também como um mecanismo parcial de atrito, devido as tensões normais resistentes ao escorregamento, que surgem devido ao confinamento passivo do tubo de aço no núcleo de concreto (DA SILVA, 2006).

O atrito depende da força normal aplicada na interface e do coeficiente de atrito, que está relacionado ao grau de rugosidade da superfície do aço e à condição da interface (OLIVEIRA, 2008). O coeficiente de atrito varia de 0,0 a 0,6, respectivamente, para superfícies internas revestidas por óleo lubrificante e para condições normais de utilização (DA SILVA, 2006).

Acerca do comportamento de pilares mistos preenchidos, vários estudos vem sendo realizados, desde algumas décadas, sobre a influência dessa tensão de aderência entre os materiais.

Um dos primeiros estudos foi feito por VIRDI E DOWLING (1980) que chegou a conclusão que a tensão de aderência não é influenciada pelo comprimento da interface aço-concreto, diâmetro e espessura do tubo de aço e resistência à compressão do concreto.

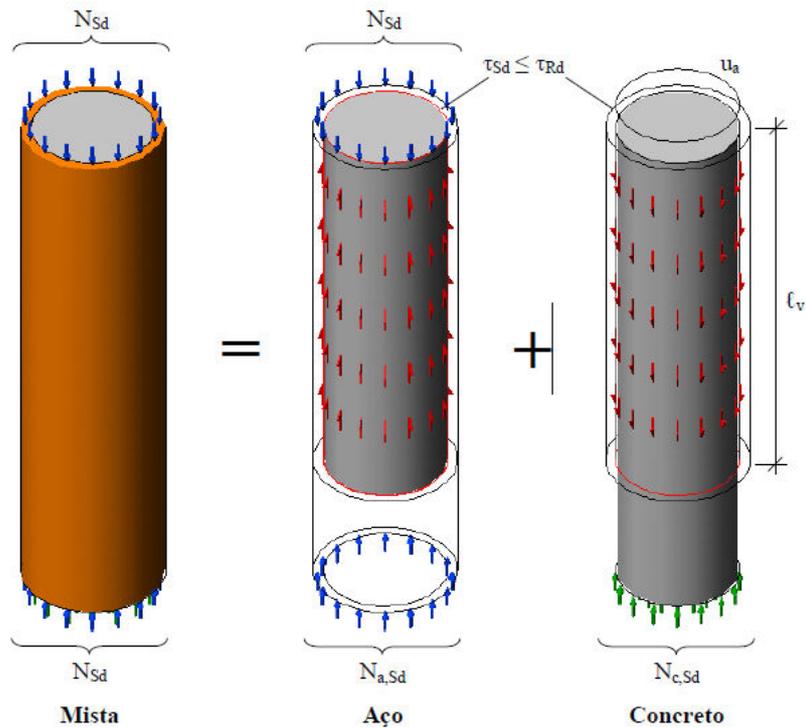
CEDERWALL & ENGSTRON & GRAUERS (1990) analisaram seções preenchidas com concreto de alta resistência, variando a resistência à compressão do concreto, resistência ao escoamento do aço e a espessura do aço. Reduziu a aderência e variou também a área de aplicação de carga, sendo somente no núcleo de concreto, somente no tubo de aço ou simultaneamente nos dois materiais. O estudo concluiu que a diferença de comportamento na

maneira como a carga é aplicada não é representativa quando não se reduz a aderência. Já os pilares com aderência reduzida verificou-se uma capacidade resistente maior quando a força foi aplicada apenas no concreto.

LI *et al.* (2003) realizaram um estudo da aderência para perfis curtos e finos, com  $D = 100mm$ ,  $L = 300mm$  e  $t = 16mm$  variando apenas o tipo de concreto usado. Os concretos utilizados foram o convencional, concreto com adição de cinza volante e concreto com adição de agente expansivo. Ao analisarem a tensão de aderência aos 7 dias e 28 dias, concluíram que o concreto com adição de cinza volante teve o maior aumento de tensão de aderência, porém o concreto com agente expansivo é o tipo mais eficiente para pilares preenchidos usados nas edificações, pois tem boa aderência pouco tempo após a concretagem.

GIAKOUMELIS & LAN (2004) analisam o comportamento de pilares com perfis circulares de aço preenchidos de concreto submetidos à compressão simples. Para as análises foram mantidos o diâmetro da seção e o comprimento; variado a espessura do perfil de aço; os tipos de concreto, utilizando concretos com diferentes valores de resistência à compressão e tipos de superfícies internas dos tubos com ou sem a aplicação de graxa. O estudo foi feito para investigar o efeito da variação da espessura do perfil de aço, a tensão de aderência entre o aço e o concreto e o efeito de confinamento que o tubo exerce.

As regiões onde há variações localizadas dos esforços solicitantes, são as chamadas regiões de introdução de cargas, que são devido, por exemplo, à ligações de vigas com pilares. Nessas regiões se torna difícil garantir que as tensões são distribuídas a toda seção de acordo com as resistências de cada material. Sendo assim, o escorregamento significativo na interface aço-concreto deve ser evitado, para ocorrer a consolidação da ação conjunta. A região de introdução de cargas deve ter um comprimento  $l_v$ , como mostrado na Figura 2.9, e esse comprimento não deve exceder duas vezes a dimensão predominante da seção transversal.



**Figura 3.9** – Componentes das ações de cálculo e propriedades geométricas para o cálculo da tensão de cisalhamento na interface (JOHANSSON, 2003).

A tensão de cisalhamento transferida longitudinalmente na interface não tem um procedimento padrão para ser calculada, sendo assim pode ser obtido um valor médio dessa tensão, dado pela razão entre o componente da força normal no concreto,  $N_{c,sd}$ , e a área de transferência na interface. Esta área é o produto do perímetro transversal,  $u_a$ , pelo comprimento,  $l_v$ . Esse valor médio da tensão de cisalhamento transferida longitudinalmente é dado pela Equação 2.2:

$$\tau_{sd} = \frac{N_{c,sd}}{u_a \cdot l_v} \quad \text{EQ. 2.2}$$

Os conectores mecânicos são utilizados quando a aderência natural não tem capacidade suficiente para resistir às tensões de cisalhamento de cálculo requeridas. A resistência ao cisalhamento tem valores, especificados pela norma NBR 8800:2008, iguais a 0,4 MPa para seções tubulares retangulares e 0,55 MPa para seções tubulares circulares, como mostram os dados na Tabela 2.3.

**Tabela 3.3** – Tensão de cisalhamento resistente de cálculo  $\tau_{Rd}$  (ABNT NBR 8800:2008).

<b>Tipo de seção transversal do pilar misto</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>
Seção totalmente revestida	0,30
Seção tubular circular preenchida	0,55
Seção tubular retangular preenchida	0,40
Mesas de seção parcialmente revestida	0,20
Almas de seção parcialmente revestida	0,00

Segundo DA SILVA (2006), as vantagens alcançadas em perfis tubulares de aço preenchidos de concreto só são concretizadas quando ocorre a transferência integral de tensões entre o tubo de aço e o núcleo de concreto.

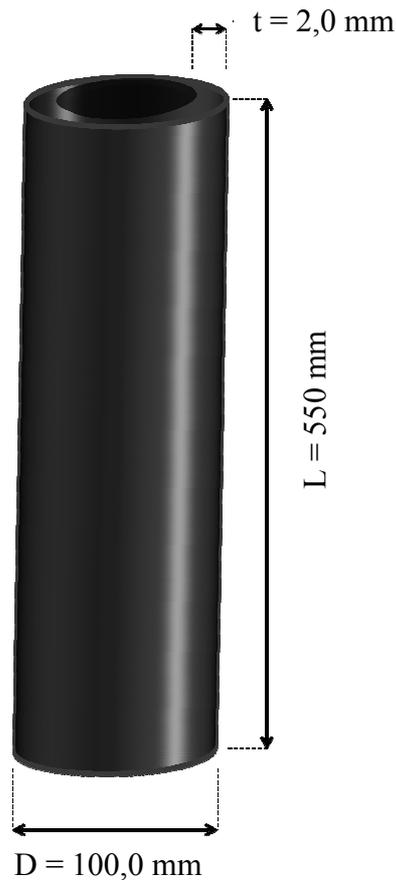
### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no preparo de perfis tubulares finos de aço preenchidos com diferentes tipos de concreto, para a análise da aderência entre os materiais constituintes do perfil misto. Para tanto são apresentadas a descrição e propriedades de cada material utilizado e as técnicas utilizadas para confecção dos protótipos de interesse.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Aço

Uma vez que o objetivo do trabalho é a análise de aderência dos concretos ao aço em perfis tubulares finos, foram utilizados tubos circulares com espessura consideravelmente pequena e o diâmetro externo do tubo sendo um dos menores encontrados no mercado, utilizando então o aço SAE 1008. O comprimento do perfil foi definido a partir dos cálculos estabelecidos pelo método simplificado da NBR 8800:2008 e também respeitando a altura disponível no equipamento onde seriam realizados os ensaios de resistência à compressão. As dimensões dos tubos foram mantidas constantes para todos os protótipos utilizados no estudo, sendo estas o diâmetro externo do tubo (D) igual a 100 mm, espessura do tubo (t) igual a 2 mm e seu comprimento (L) igual a 550 mm, conforme representado na Figura 3.1.



**Figura 4.1** – Dimensões dos tubos de aço utilizados no trabalho.

### 3.1.2 Concreto

A fim de analisar a aderência em perfis tubulares mistos, com foco em perfis finos e preenchidos com diferentes tipos de concreto, foram estabelecidos três tipos de concreto no preenchimento dos perfis: concreto convencional (CC), concreto leve (CL) e concreto com ar incorporado (CAI), todos confeccionados no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMC<sup>2</sup>, Universidade Federal de Ouro Preto, adotando resistência à compressão de 15 MPa. A escolha de três diferentes concretos teve como objetivo avaliar a influência do tipo de concreto na aderência entre os componentes das seções mistas quando submetidos a esforços compressivos. Na Tabela 3.1 apresenta os materiais utilizados em cada tipo de concreto.

**Tabela 4.1** – Materiais utilizados nos concretos

TIPO DE CONCRETO	MATERIAL UTILIZADO					fck
	AGLOMERANTE	AGREGADO GRAÚDO		AGREGADO MIÚDO	ADITIVO	
CC	Cimento - CP III 40	Brita 0	Brita 1	Areia	Muraplast FK 310	15 (MPa)
CL	Cimento - CP III 40	Argila Expandida 1506	Argila Expandida 2215	Areia	Muraplast FK 310	15 (MPa)
CAI	Cimento - CP III 40	Brita 0	Brita 1	Areia	Centrament Air 202	15 (MPa)

### 3.1.2.1 Aglomerante

Em todos os tipos de concreto foi utilizado o Cimento Portland de alto-forno CPIII-40, sem adições, que atendem às exigências químicas, físicas e mecânicas apresentadas pela NBR 5735 (1991), conforme Tabela 3.2.

**Tabela 4.2** – Exigências físicas, mecânicas e químicas do CPIII-40 (ABNT NBR 5735:1991).

Exigências químicas			
Determinações químicas	Unidade	Limites	
Perda ao fogo (PF)		-4,5	
Resíduo insolúvel (RI)	% da massa	-1,5	
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		-4,0	
Anidro carbônico (CO <sub>2</sub> )		-3,0	
Exigências físicas e mecânicas			
Características e propriedades	Unidade	Limites	
Finura (Resíduo na peneira 7,5 µm)	%	-8,0	
Tempo de início de pega	h	1	
Expansibilidade a quente	mm	-5	
Resistência à compressão	3 dias	MPa	12,0
	7 dias	MPa	23,0
	28 dias	MPa	40,0

### *3.1.2.2 Agregados graúdos*

Para a produção do CC e CAI utilizou-se a Brita 0 e Brita 1, materiais fornecidos pela empresa Martins Lanna, localizada na cidade de Contagem/MG, na Estrada da Pedreira - Granja Ouro Branco.

### *3.1.2.3 Argila Expandida*

Para a produção do concreto leve utilizou-se como agregado graúdo a argila expandida, adquirida junto à empresa Cinexpan, em substituição às britas 0 e 1 utilizadas nos CC e CAI. A argila expandida foi utilizada somente após sua saturação, devido seu alto índice absorção de água (conforme NBR 12821). A quantidade de água absorvida pelo agregado foi corrigida nos cálculos do fator água/cimento.

As características da argila expandida, de acordo com os dados adquiridos junto ao fornecedor, são:

ARGILA TIPO 1506 - Equivalente a Brita 0:

- ✓ Massa unitária = 0,6 kg/dm<sup>3</sup>
- ✓ Massa específica = 1,11 kg/dm<sup>3</sup>
- ✓ Módulo de finura = 7

ARGILA TIPO 2215 - Equivalente a Brita 1:

- ✓ Massa unitária = 0,5 kg/dm<sup>3</sup>
- ✓ Massa específica = 0,64 kg/dm<sup>3</sup>
- ✓ Módulo de finura = 6

### *3.1.2.4 Agregado miúdo*

O agregado miúdo utilizado em todos os tipos de concreto analisados foi a areia natural de rio, do município de Ponte Nova/MG.

### *3.1.2.5 Aditivos*

Na execução dos concretos CC e CL utilizou-se o aditivo Muraplast FK 310 e na execução do CAI foi utilizando o aditivo Centrament Air 202, com apresentado na Tabela 3.3, ambos doados pela empresa MC - Bauchemie Brasil.

**Tabela 4.3** - Características dos aditivos.

<b>Aditivo</b>	<b>Dosagem* (%)</b>	<b>Tipo de Produto</b>	<b>Estado</b>	<b>Cor</b>	<b>Atuação</b>
<b>Muraplast FK 310</b>	0,2 a 1,0	Plastificante multifuncional de pega normal	Líquido	Castanho	Dispersor de partículas de cimento.
<b>Centrament Air 202</b>	0,02 a 0,5	Incorporador de ar	Líquido	Castanho	Incorporador de micro- poros de ar, com diâmetro menor que 0,3mm.

\* Porcentagem em relação ao peso do cimento

## **3.2 Métodos**

### **3.2.1. Corte do perfil tubular fino de aço**

O perfil estabelecido para os ensaios é formado à frio e foi adquirido junto à empresa Minasfer, localizada na cidade de Mariana/MG, cortado no laboratório de Estruturas Altamiro Tibiriçá Dias - UFOP, utilizando-se uma máquina de serra de fita Starrett, modelo S3720.

### **3.2.2. Dosagem dos concretos**

O traço projetado para os concretos estudados, foi feito em massa, respeitando-se uma resistência à compressão estabelecida em 15 MPa aos 28 dias.

As dosagens dos concretos foram feitas utilizando-se o Software Especialista para Dosagem de Misturas Cimentícias, desenvolvido pelo grupo de pesquisas RECICLOS e adotando-se o método ABCP. O método ABCP foi escolhido por considerar as características físicas dos agregados graúdos e miúdos e por possibilitar menor consumo de cimento.

Na Tabela 3.4 são apresentados os traços (Cimento : Agregado Miúdo : Agregado Graúdo 1 : Agregado Graúdo 2) de cada tipo de concreto, considerando SLUMP da ordem de 80(±10)mm, para que todos apresentem as mesmas características no estado fresco.

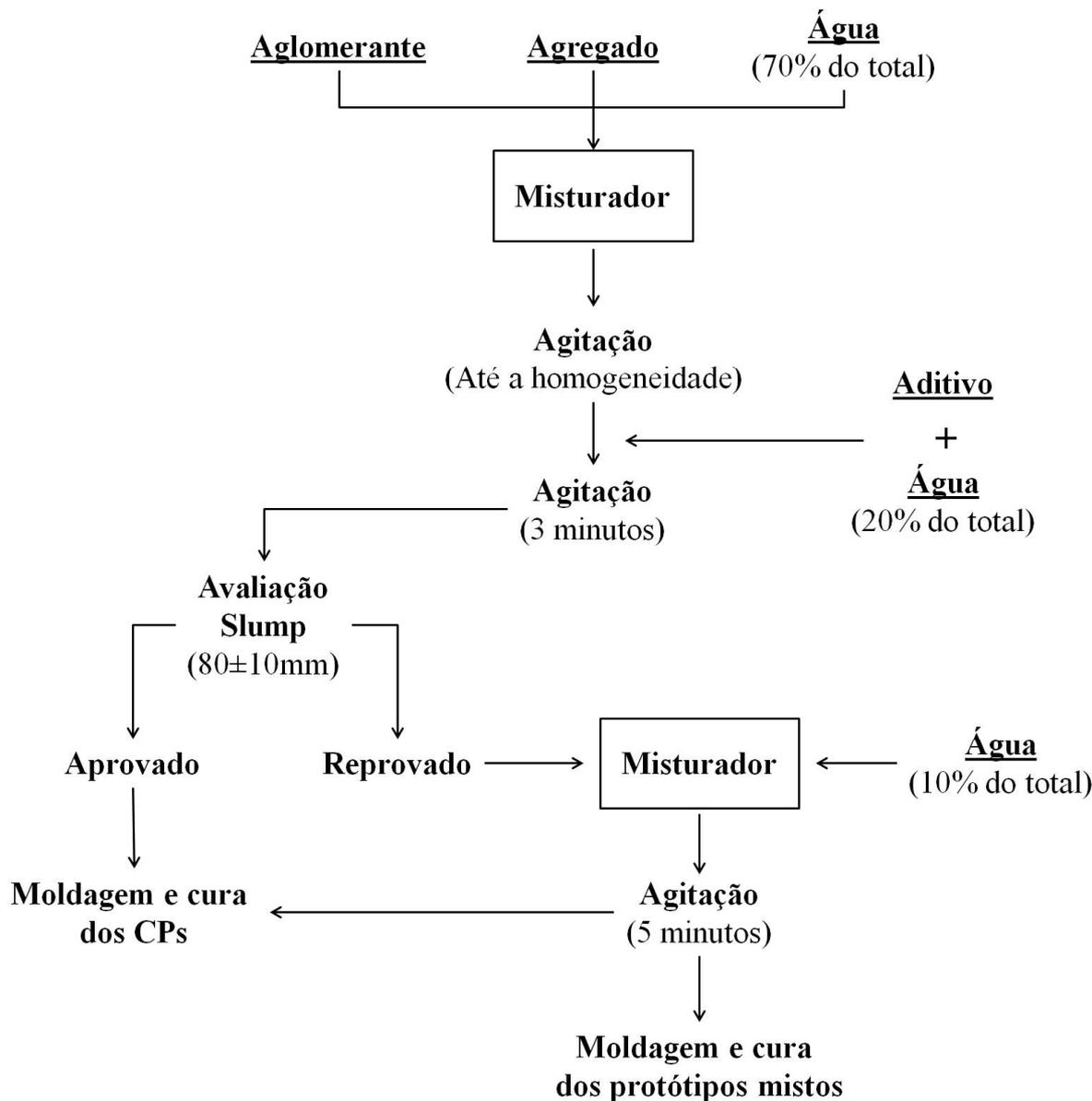
**Tabela 4.4** – Traços calculados para o CC, CL e CAI.

CONCRETO	TRAÇO	ADITIVOS		A/C (teórico)	A/C (corrigido)
		Plastificante	Incorp. de ar		
CC	1 : 2,71 : 1,54 : 2,41	1%	-	0,68	0,64
CL	1 : 1,55 : 0,79 : 1,47	1%	-	0,74	0,45
CAI	1 : 2,71 : 1,54 : 2,41	-	0,15%	0,68	0,57

Para a obtenção dos traços, os concretos foram misturados no Misturador Forçado, da marca CSM, modelo MF 270 trifásico, seguindo orientações do fabricante dos aditivos utilizados. Para a mistura de todos os concretos, adicionou-se todo o aglomerante e o agregado ao misturador com 70% da água total, até a mistura se tornar homogênea. Em seguida foi colocado o aditivo, diluído em 20% da água total, sendo mantido sob agitação durante 3 minutos, sendo que quando necessário acrescentou-se os 10% da água total restante ao final do processo, submetendo o material a mais 5 minutos de agitação. A necessidade de se agitar por mais 5 minutos foi devido ao fato que, embora o aditivo fosse altamente reativo, o mesmo demanda muita energia para dar inícios às reações. Para avaliação da necessidade da adição dos últimos 10% da água total, foi feito o ensaio de abatimento de tronco, buscando-se alcançar o slump ideal ( $80 \pm 10$ mm).

A Figura 3.2 sintetiza em um fluxograma todo o processo de definição dos traços dos concretos, de acordo com o processo descrito acima e com os valores contidos na Tabela 3.4.

Após a definição dos traços e produção dos concretos desejados, foram moldados corpos de prova (CP) e vibrados na mesa vibratória por 20 segundos, para expulsar as bolhas de ar. Os procedimentos de moldagem e cura foram realizados segundo NBR 5738:2003. Todos CPs foram desmoldados após 24h e mantidos em câmara úmida com umidade e temperatura controladas, até a idade de 28 dias, para realização de análises de resistência à compressão, módulo de elasticidade e massa específica.



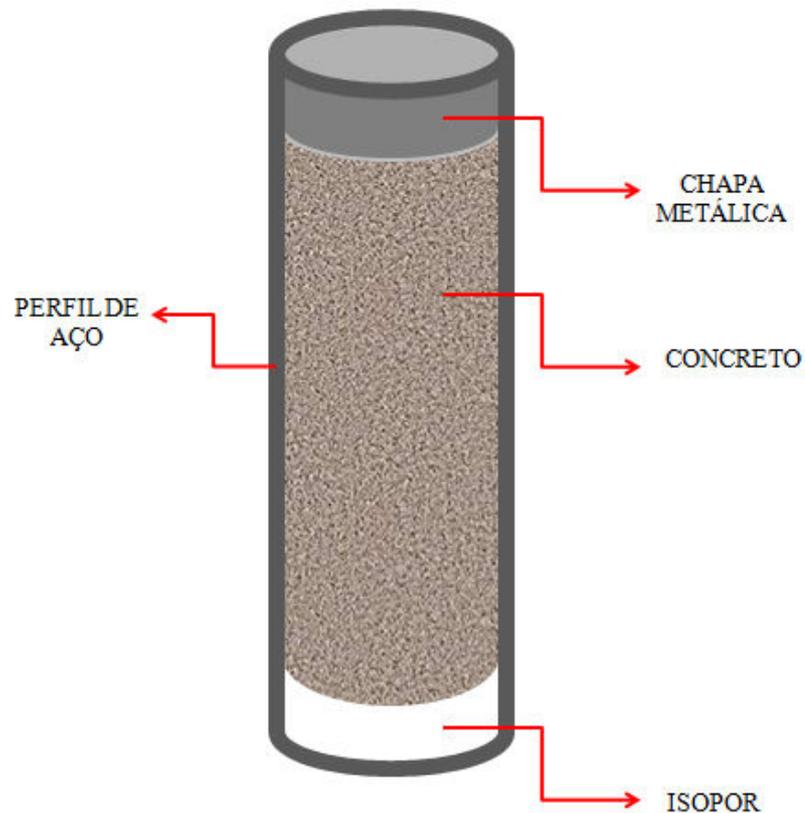
**Figura 4.2** - Fluxograma do processo de obtenção do traço dos concretos.

### 3.2.3. Perfil Tubular Misto Aço-Concreto

Para a confecção de cada um dos perfis tubulares mistos, inicialmente foi afixada à base do tubo uma placa de poliestireno expandido (Isopor®) de 20 mm de espessura e diâmetro igual ao diâmetro interno do tubo, com o intuito de, após o processo de cura do concreto, obter-se uma região sem preenchimento para que o concreto possa se deslocar no momento de aplicação da força de compressão durante a análise da aderência.

Uma vez estando devidamente afixada a base de Isopor®, o tubo foi preenchido com o concreto (CC, CI e CAI) até uma altura a 16 mm abaixo da extremidade superior,

devidamente regularizado, com o objetivo de introduzir-se uma chapa metálica de 16 mm de espessura e diâmetro de 93mm, para ser a região de aplicação da carga no núcleo de concreto. Após o preenchimento com concreto, estes foram vibrados com vibrador manual, de forma a expulsar as bolhas de ar. A representação da composição do perfil misto está mostrada, esquematicamente, na Figura 3.3.



**Figura 4.3** - Representação esquemática do perfil tubular misto.

Assim como na produção dos CPs do concreto, após a produção dos protótipos mistos desejados, estes foram conduzidos com os devidos cuidados e mantidos na câmara úmida com temperatura de 30°C e umidade de 98%, até a idade de 28 dias, para a realização dos ensaios desejados. No total foram confeccionados 4 protótipos para cada variação do tipo de concreto, totalizando 12 protótipos a serem ensaiados para análise da aderência.

### TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

No Capítulo 4 são descritas as técnicas e os equipamentos utilizados na caracterização dos agregados e aditivos utilizados na produção dos concretos, os ensaios realizados com os concretos no estado fresco e endurecido e também os ensaios realizados nos protótipos mistos para a análise da aderência entre os componentes.

#### 4.1. Caracterização dos agregados

As britas 0 e 1 utilizadas como agregado graúdo dos concretos CC e CAI foram caracterizadas de acordo com os seguintes parâmetros e suas respectivas normas:

- Massa específica - NBR NM 52: 2009;
- Massa unitária - NBR NM 45:2009;
- Teor de umidade - NBR 9939:2012;
- Granulometria - NBR 7217:1987;

A areia que foi utilizada nos três tipos de concreto segue os mesmo parâmetros utilizados para os agregados graúdos, acrescidos de:

- Absorção de água - NBR NM 30:2001

#### 4.2. Caracterização do concreto no estado fresco

A caracterização dos concretos CC, CL e CAI no estado fresco foi realizada seguindo a norma NBR NM 67:1998 que avalia sua consistência pelo abatimento de tronco de cone - *SLUMP test*, conforme representado na Figura 4.1. No cálculo das dosagens foi determinado que todos os concretos deveriam apresentar 80 ( $\pm$  10)mm de slump.



**Figura 5.1-** Análise da consistência do concreto pelo abatimento de tronco de cone.

#### **4.3. Caracterização do concreto no estado endurecido**

Os concretos CC, CL e CAI foram caracterizados em seus estados endurecidos com os seguintes parâmetros e suas respectivas normas:

- Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica - NBR 9778:2005;
- Resistência a compressão simples - NBR 5739:2007;
- Módulo de elasticidade estático - NBR 8522:2008;

Para realização dos ensaios de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dos concretos foram utilizados 4 CPs de cada tipo (CC, CL e CAI) em cada um dos ensaios e para massa específica 3 CPs de cada tipo de concreto. Todos os CPs foram inicialmente capeados com enxofre para a regularização das superfícies, como mostra a Figura 4.2.



**Figura 5.2** - Corpos de prova capeados com enxofre.

Foi utilizado o conjunto de uma prensa servo-controlada, modelo DL 20000-EMIC e PC 200 com carga máxima de 2000 kN , representada na Figura 4.3.



**Figura 5.3** - Conjunto PC-200 e DL 20000-EMIC.

### 4.3.1. Absorção de água, índice de vazios e massa específica

A determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto no estado endurecido foi utilizada a NBR 9778:2005. Utilizou-se 3 CPs de cada tipo de concreto com a idade de 3 dias, colocando-os na estufa para definir inicialmente sua massa seca ( $m_s$ ) após 72h e em seguida subtidos a 72h de imersão. Posteriormente, os CPs foram colocados imersos em água sob fervura por 5h. A norma NBR 9778:2005 permite que a determinação das massas em condição de imersão ( $m_i$ ) e saturada ( $m_{sat}$ ) podem ser realizadas antes ou após a fervura. Devido às condições experimentais utilizadas, as massas em condição de imersão ( $m_i$ ) e saturada ( $m_{sat}$ ) de todos CPs foram determinadas antes da fervura. Com todos os dados de  $m_s$ ,  $m_i$  e  $m_{sat}$  determinados, foi possível então determinar as características de absorção de água, índice de vazios e massa específica a partir da Equação 4.1 à Equação 4.5.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{EQ. 4.1}$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{EQ. 4.2}$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{EQ. 4.3}$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \text{EQ. 4.4}$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{EQ. 4.5}$$

Onde:  $m_s$  é a massa da amostra seca em estufa

$m_i$  é a massa da amostra saturada imersa em água

$m_{sat}$  é a massa da amostra saturada em água

A é absorção de água (%)

$I_v$  é índice de vazios (%)

$\rho_s$  é massa específica da amostra seca

$\rho_{sat}$  é massa específica da amostra saturada

$\rho_r$  é massa específica real

### 4.3.2. Resistência a compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples, foi realizado com velocidade de 0,45 MPa/s e após a realização do ensaio, foi possível determinar a resistência à compressão através Equação 4.6 e em seguida calculada a média.

$$R_c = \frac{P}{A} \quad \text{EQ. 4.6}$$

Onde  $R_c$  é a resistência à compressão em MPa,  $P$  a carga de ruptura em kN e  $A$  a área transversal do corpo de prova em  $m^2$ .

### 4.3.3. Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi executado a partir ciclos de carregamentos e descarregamentos, e para as deformações utilizou-se medidor de deformação elétrico resistivo unidirecional (strainage) modelo PA-06-800BA-120L, da marca EXCEL. Os medidores foram devidamente colocados na posição horizontal para fazer a leitura das deformações para o cálculo do coeficiente de *poisson*, já na posição verticais foram devidamente posicionados os extensômetros para avaliar as deformações verticais, conforme representado na Figura 4.4. A leitura das deformações foi realizada com o datalogger Agilent 34972A, representado na Figura 4.5.

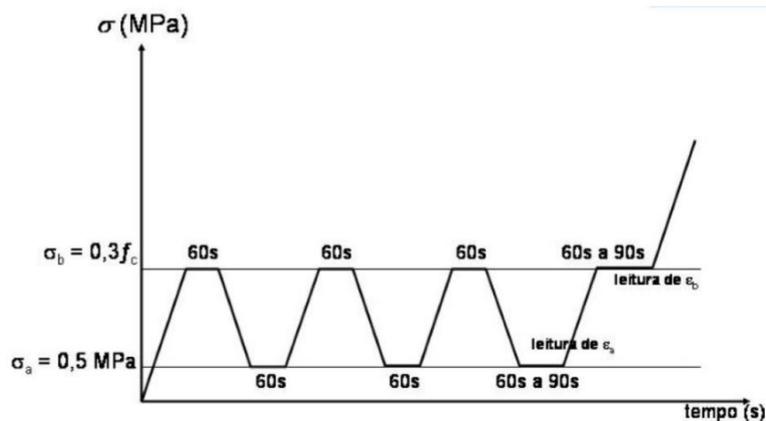


**Figura 5.4** - Ensaio de módulo de elasticidade estático.



**Figura 5.5** - Datalogger Agilent 34972A.

Para a determinação do módulo de elasticidade estático para a aplicação das cargas nos ciclos de carregamento foi utilizado o método da tensão fixa, conforme Figura 4.6. O corpo de prova foi carregado até a tensão limite superior denominada  $\sigma_b$  definida como  $0,3f_c$  e mantida por 60 segundos, seguido de um descarregamento até uma tensão próxima de 0,0MPa. Com o descarregamento, o CP é carregado novamente a uma tensão de 0,5MPa e mantida por 60 segundos. Foram realizados 4 ciclos de carregamento e descarregamento e em seguida cada um dos CPs tiveram um acréscimo de carga, à razão de  $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s até a ruptura.



**Figura 5.6** – Método da tensão fixa.

Assim, o módulo de elasticidade estático foi determinado pela Equação 4.7.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad \text{EQ. 4.7}$$

Considerando,  $\sigma_b$  a tensão maior, 0,5 a tensão básica,  $\varepsilon_b$  é deformação específica média sob tensão maior e  $\varepsilon_a$  é deformação específica média sob tensão básica.

#### 4.4. Caracterização dos protótipos mistos

Para a caracterização dos protótipos mistos foram realizados ensaios de compressão com carga aplicada no núcleo de concreto para a análise da aderência entre os componentes. Após a realização dos ensaios de compressão, foram feitas imagens de microscopia ótica em amostras das paredes do aço, para analisar a ranhura causada devido ao escorregamento do concreto.

##### 4.4.1. Análise da aderência entre os componentes

O objetivo desta análise foi avaliar o comportamento do tubo de pequena espessura com seção mista quando submetido a uma carga de compressão aplicada apenas ao núcleo de concreto, permitindo-se assim identificar qual a influência do tipo de concreto na aderência dos componentes.

Para tanto foram submetidos aos testes 12 protótipos mistos preenchidos de seção circular, de acordo com a distribuição da Tabela 4.1.

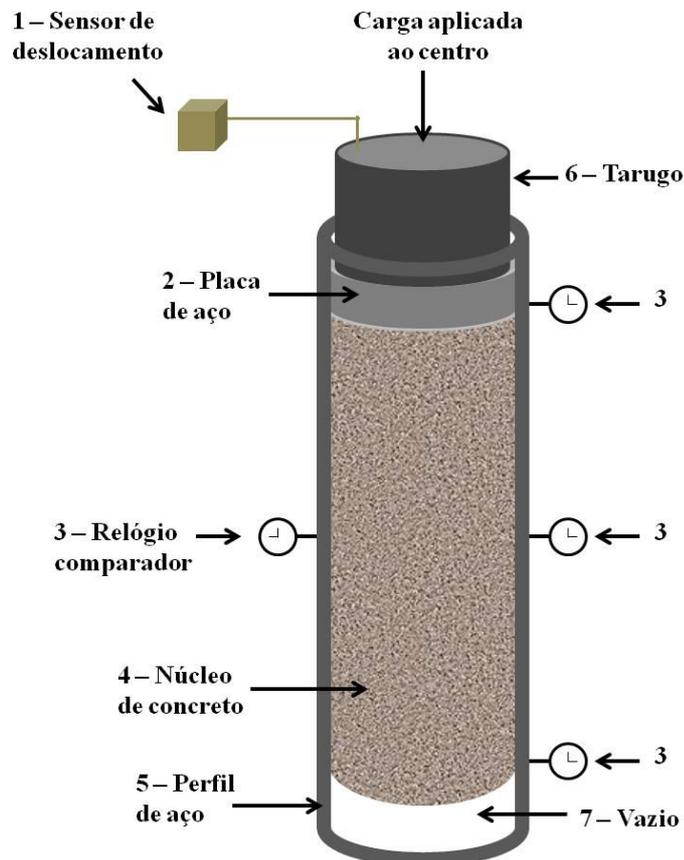
**Tabela 5.1** - Nomenclatura e características dos protótipos para o ensaio de aderência.

Protótipo	Concreto		Aço				
	Tipo	$f_{ck}$ (MPa)	D (mm)	L (mm)	t (mm)	L/D	D/t
PCC-1	CC	15	100	550	2	5,5	50
PCC-2							
PCC-3							
PCC-4							
PCL-1	CL	15	100	550	2	5,5	50
PCL-2							
PCL-3							
PCL-4							
PCAI-1	CAI	15	100	550	2	5,5	50
PCAI-2							
PCAI-3							
PCAI-4							

Em relação a nomenclatura expressa na Tabela 4.1 a letra P é a abreviação de Pilar Misto, seguido da nomenclatura do tipo de concreto já utilizados nos itens anteriores e o valor numérico de 1 a 4 representa o número do protótipo, uma vez que foram feitas 4 análises para cada tipo de preenchimento.

Nos ensaios de compressão dos protótipos mistos, assim como nos ensaios de compressão dos CPs, foi utilizado o conjunto de uma prensa servo-controlada, modelo DL 20000-EMIC e PC 200 com carga máxima de 2000 kN, tendo como critério de parada o deslocamento permitido de 20 mm.

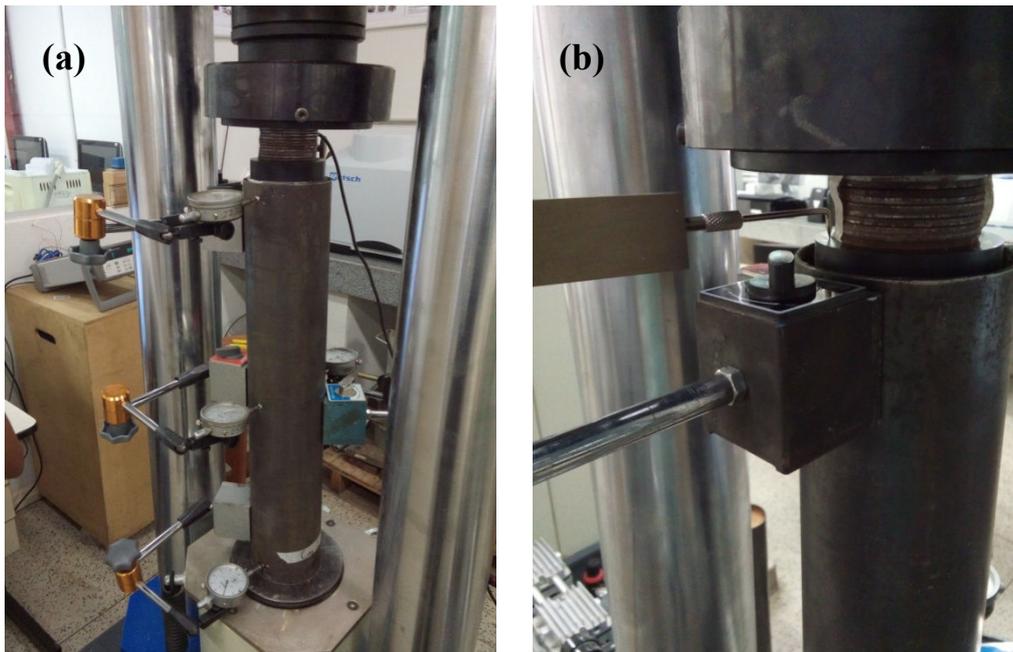
Inicialmente os protótipos foram retirados da câmara úmida, após 28 dias, para a realização dos ensaios de compressão. Os seus deslocamentos e deformações foram quantificados a partir da instrumentação, representada na Figura 4.7.



**Figura 5.7** - Representação esquemática da instrumentação dos protótipos.

Antes de localizar o protótipo na máquina, o isopor, colocado no momento da concretagem na parte inferior de cada perfil de aço (5), foi retirado, deixando assim um vazio

(7) que permite o livre deslocamento do núcleo de concreto (4) ao aplicar a carga. Um deflectômetro eletrônico (1) foi colocado no tarugo (6), a fim de medir o deslocamento do núcleo a partir da carga aplicada ao centro da placa de aço (2) e conseqüentemente avaliar a aderência do concreto ao aço. O deflectômetro utilizado foi o modelo EE05, da marca EMIC, com máxima deformação mensurável de 12,5mm e resolução de leitura de 0,001mm. Ao longo do comprimento do tubo de aço, foram colocados relógios comparadores (3) para medir a deformação axial do protótipo, conforme apresentado na Figura 4.8.



**Figura 5.8** - (a) Instrumentação para o ensaio de aderência dos protótipos, (b) detalhe do deflectômetro eletrônico.

Devidamente instrumentados e colocados na máquina, iniciou-se o procedimento de aplicação da carga no núcleo de concreto, até o início do deslocamento do núcleo.

#### 4.4.2. Microscopia Ótica

Após a realização dos ensaios de compressão nos protótipos mistos, estes foram submetidos a um corte no centro do tubo de aço, com dimensão de 5 x 5 cm, para obtenção de amostras, somente do perfil de aço, para análise de microscopia ótica, a fim de analisar o aspecto da parede de aço para as análises das tensões de aderência. Para tanto, as imagens foram obtidas utilizando-se uma câmera HDCE-X5, com resolução de 5 megapixels, acoplada a um microscópio estereoscópio Coleman, modelo NTB-3A, com aumento de 7x a 45x.

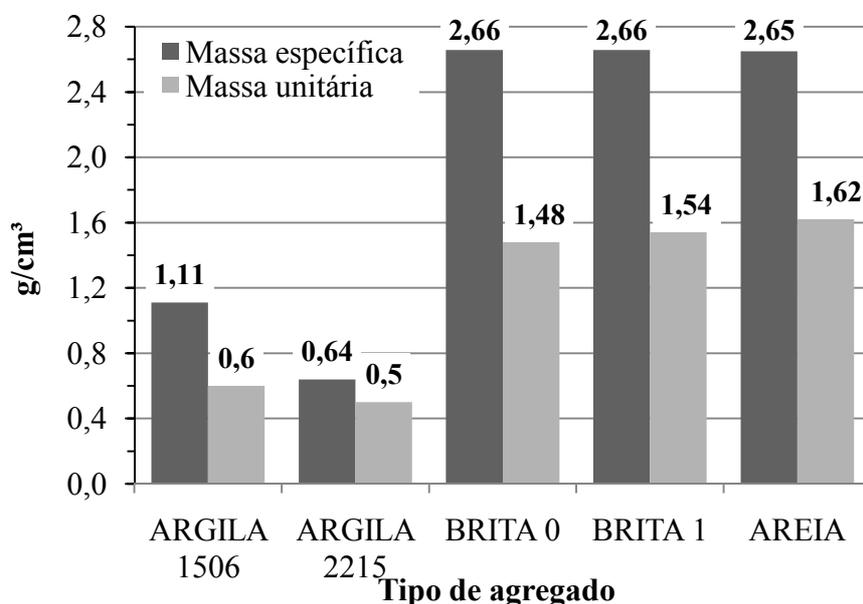
**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas caracterizações dos agregados dos concretos, nos ensaios de resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Por fim são apresentados os resultados obtidos pelos ensaios de compressão do núcleo de concreto e de microscopia ótica, utilizados para análise das tensões de aderência nos pilares mistos.

**5.1 Caracterização dos agregados**

**5.1.1. Massa específica e Massa unitária**

Os resultados da massa específica e massa unitária dos agregados graúdos normais, agregados graúdos leves e agregado miúdo, utilizados como componentes dos traços dos concretos CC, CL e CAI, estão representados na Figura 5.1.



**Figura 6.1** - Massa específica e massa unitária dos agregados.

A partir das informações contidas na Figura 5.1, é possível observar que os valores de massa específica encontrados para os agregados graúdos leves são consideravelmente inferiores aos valores de massa específica dos agregados graúdos normais. Sendo a argila

expandida do tipo 1506 o agregado graúdo correspondente à Brita 0 no concreto leve, a primeira apresenta uma massa específica, aproximadamente, 58,3% inferior que a segunda, enquanto que a argila expandida do tipo 2215, que por sua vez, corresponde à Brita 1 no concreto leve, apresenta uma massa específica, aproximadamente 76,0% inferior. Consequentemente, a utilização de um agregado com massa específica representativamente menor contribui, significativamente, para um concreto mais leve.

Em relação à massa unitária, as argilas expandidas 1506 e 2215, utilizadas na confecção dos concretos leves, apresentam valores de 0,6 e 0,5 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, classificando-as como agregado graúdo leve. A Brita 0 apresenta um valor de massa unitária de 1,48 g/cm<sup>3</sup>, a Brita 1 apresenta um valor de 1,54 g/cm<sup>3</sup> e por fim a areia apresenta massa unitária no valor de 1,62 g/cm<sup>3</sup>.

Segundo Metha & Monteiro (2014), os agregados classificam-se em normais, leves ou pesados, delimitando aos agregados graúdos leves valores de massa unitária abaixo de 1,0 g/cm<sup>3</sup>, aos agregados graúdos normais valores entre 1,0 e 2 g/cm<sup>3</sup> e por fim aos agregados miúdos valores de massa unitária variando de 1,30 a 1,75 g/m<sup>3</sup>. Sendo assim, os valores obtidos de massa unitária dos agregados graúdos e miúdo estão dentro das faixas estabelecidas.

### 5.1.3. Módulo de finura e Dimensão máxima do agregado

A partir do ensaio de granulometria realizado para os agregados graúdos normais e o agregado miúdo e a granulometria fornecida pelo fabricante dos agregados graúdos leves, determinou-se o módulo de finura e dimensão máxima dos mesmos, conforme Tabela 5.1. Valores estes são utilizados no Software Especialista para Dosagem de Misturas Cimentícias na determinação dos traços dos concretos utilizados.

**Tabela 6.1** - Módulo de finura e Dimensão máxima característica dos agregados.

Agregados		Módulo de Finura	Dimensão Máxima Característica
<b>Agregados Graúdos Leves</b>	Argila 1506	6,0	12,5
	Argila 2215	7,0	19,0
<b>Agregados Graúdos Normais</b>	Brita 0	6,1	12,5
	Brita 1	7,0	19,0
<b>Agregado Miúdo</b>	Areia	2,32	2,4

## 5.2. Caracterização do concreto no estado fresco

### 5.2.1. Ensaio de abatimento do tronco de cone

Na caracterização do CC no estado fresco, adotou-se para o aditivo plastificante uma porcentagem de 1% em relação ao peso do cimento, chegando portanto, a um slump dentro do valor estabelecido e o fator a/c teve um pequena redução em seu valor.

Devido à pré-saturação de 24h da argila expandida, no momento da mistura do CL houve alterações nos valores de slump em relação ao desejado, pois o cálculo teórico do fator a/c não considera a quantidade adicional de água proveniente da saturação da argila. Como resultado disso teve-se um fator teórico a/c elevado, o que levou a exsudação do concreto na análise do slump. A partir disso, foi acrescentando-se quantidades adicionais de 10% do valor de cimento e 10% do valor da areia até se obter um valor de slump dentro do valor determinado, conseqüentemente houve uma redução no valor do fator a/c.

O CAI foi dosado de acordo com o CC, porém com a presença do aditivo incorporador de ar, seu ensaio de abatimento de tronco de cone sofreu alterações. No primeiro momento, adotou-se para o aditivo a porcentagem de 0,2% em relação ao peso do cimento, chegando a um slump de 100 mm, ficando acima do estabelecido. A partir do primeiro resultado, mudou-se as porcentagens do aditivo até chegar ao slump dentro da faixa de valor desejado.

Na Tabela 5.2, mostra os valores obtidos no abatimento tronco de cone dentro do limite estipulado de 80(±10)mm.

**Tabela 6.2 - Abatimento tronco de cone**

<b>CONCRETO</b>	<b>A/C</b>	<b>Slump (mm)</b>
<b>CC</b>	0,64	80
<b>CL</b>	0,45	85
<b>CAI</b>	0,57	85

### 5.3. Caracterização do concreto no estado endurecido

#### 5.3.1. Absorção de água por imersão e índice de vazios

Para o cálculo da absorção de água por imersão e índice de vazios, para cada tipo de concreto, foram tomadas as massas de imersão ( $m_i$ ) e saturada ( $m_{sat}$ ) de todos CPs antes da fervura. Os resultados são apresentados na Figura 5.2.

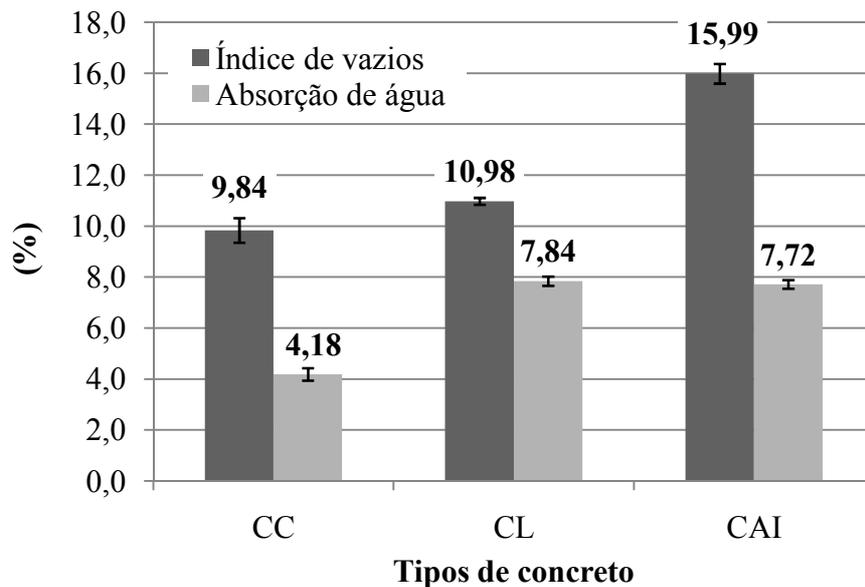


Figura 6.2 - Absorção de água por imersão e índice de vazios.

Os resultados mostram que o concreto com argila expandida como agregado leve (CL) e o concreto com incorporação de ar (CAI), possuem valores de absorção de água muito próximos, 7,84% e 7,72%, respectivamente, sendo representativamente iguais, enquanto que o concreto convencional (CC) apresenta o menor índice de absorção de água, 4,18%. Em relação aos resultados para índice de vazios o CAI é o que apresenta maior porcentagem, 15,99%, seguido do CL com 10,98% e do CC com 9,84% de índice de vazios.

O fato do CAI ter maior absorção de água que o CC é devido ao maior valor de índice de vazios, logo maior porosidade, obtido pelo uso de aditivo incorporador de ar, uma vez que ambos os CPs eram constituídos dos mesmos agregados. Quando é feita a comparação entre o CL e o CC, nota-se uma proximidade muito grande do índice de vazios, contrastando com uma diferença, significativa, da absorção de água. Uma vez que a capacidade de absorção de água está diretamente ligada ao índice de vazios, espera-se que o CC e o CL apresentem

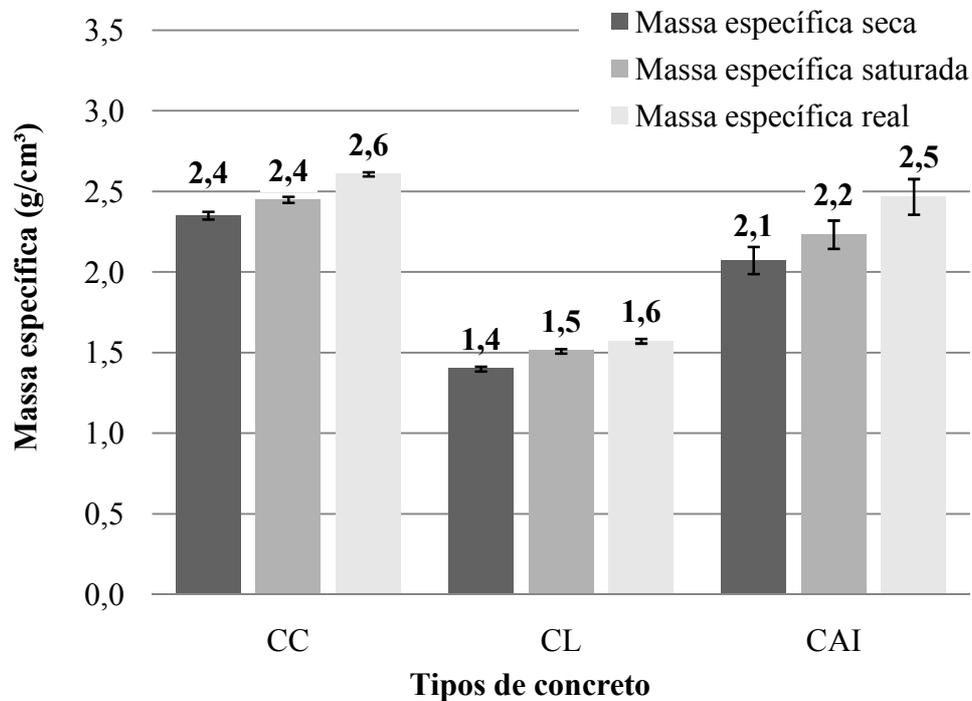
capacidades de absorção tão próximas quanto o índice de vazios. Porém, uma vez que, a argila expandida, utilizada como agregados no CL, tem maior capacidade de absorção de água que a brita, utilizada como agregado no CC, justifica-se a diferença observada na absorção de água.

Um outro resultado interessante, obtido a partir da análise do gráfico da Figura 5.2 reside nos valores de absorção de água praticamente iguais do CL em relação ao CAI, mesmo ambos apresentando um valor para índice de vazios bastante diferentes. Analisando primeiramente em relação aos materiais, uma vez que o CAI possui os mesmos materiais constituintes que o CC, espera-se que a absorção de água no CAI seja inferior ao CL. Porém, devido ao fato de o CAI possui poros incorporados por aditivo, isto faz com que seu índice de vazios aumente, aumentando assim, consequentemente, sua absorção até um valor próximo ao do CL, a ponto de serem considerados iguais.

Somado ao exposto até este ponto, em relação à Figura 5.2, observa-se também que o aumento no índice de vazios do CAI não foi acompanhado pelo aumento na absorção, o que seria lógico, uma vez que há uma relação direta entre ambas as grandezas. Esta constatação é um indicativo que os poros existentes na estrutura do CAI se tratam de meso e macroporos independentes, ou seja, sem a formação de uma rede de percolação. Esta não formação de uma rede de percolação é um resultado bastante satisfatório, pois aumenta a durabilidade e a resistência térmica do concreto. O aumento da durabilidade ocorre, pois, estando o mesmo sob uma atmosfera saturada de gás carbônico, este último não consegue penetrar no concreto sem a existência de uma rede de percolação. Dessa forma, não haverá a reação do  $\text{CO}_2$  com o Ca, presente no concreto, levando a formação do CaO, o que causa fraturas na estrutura do concreto diminuindo sua durabilidade. De forma análoga, quando o concreto se encontra utilizado como preenchimento de estruturas mistas, haverá uma menor oxidação da parede do aço na interface aço-concreto. A maior resistência térmica está ligada ao fato dos poros estarem isolados, pois, isto garante a diminuição da pressão higroscópica dentro do material. Esta diminuição ocorre, uma vez que, dentro das cavidades dos poros não há saturação de água, assim, quando submetido ao aquecimento, haverá ainda um espaço residual no interior dos poros para a expansão da água, evitando-se fraturas no concreto derivadas desta expansão.

### 5.3.2. Massa específica

Os resultados obtidos para a massa específica do concreto no estado endurecido apresentam-se na Figura 5.3.



**Figura 6.3** - Massas específicas dos concretos.

A partir dos resultados expressos no gráfico da Figura 5.3, observa-se que o CC e o CAI podem ser classificados como concretos normais em relação à massa específica e o CL como concreto leve (AGUIAR, 2004 apud PEIXOTO, 2004).

Quanto ao CC e CAI, estes apresentam valores de massa específica próximos, por serem dosados com o mesmo tipo de agregado, porém a pequena diferença existente entre os valores é devido a incorporação de ar no CAI, tornando-o menos denso que o CC.

Em relação ao CL, sua massa específica apresenta-se expressivamente menor que os demais, por ser a argila expandida o agregado utilizado em sua dosagem, uma vez que a argila possui massa específica menor que o agregado utilizado nos demais tipos de concreto utilizado. Desta forma, o CL se torna o concreto com menor densidade em relação aos demais, o que contribui para obter estruturas mais leves a partir de sua utilização.

#### 5.2.4. Módulo de elasticidade

Os resultados obtidos para a módulo de elasticidade do concreto no estado endurecido, apresentam-se na Figura 5.4.

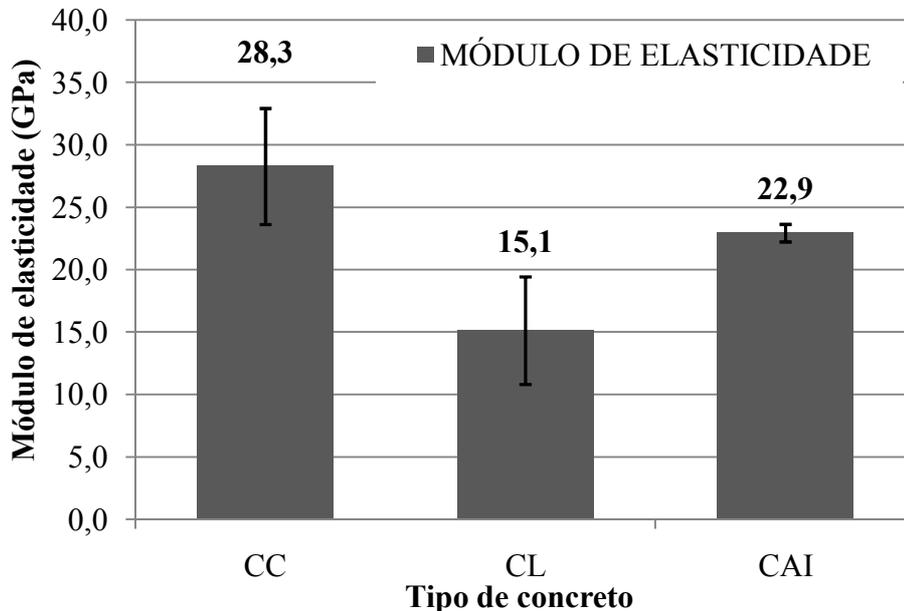
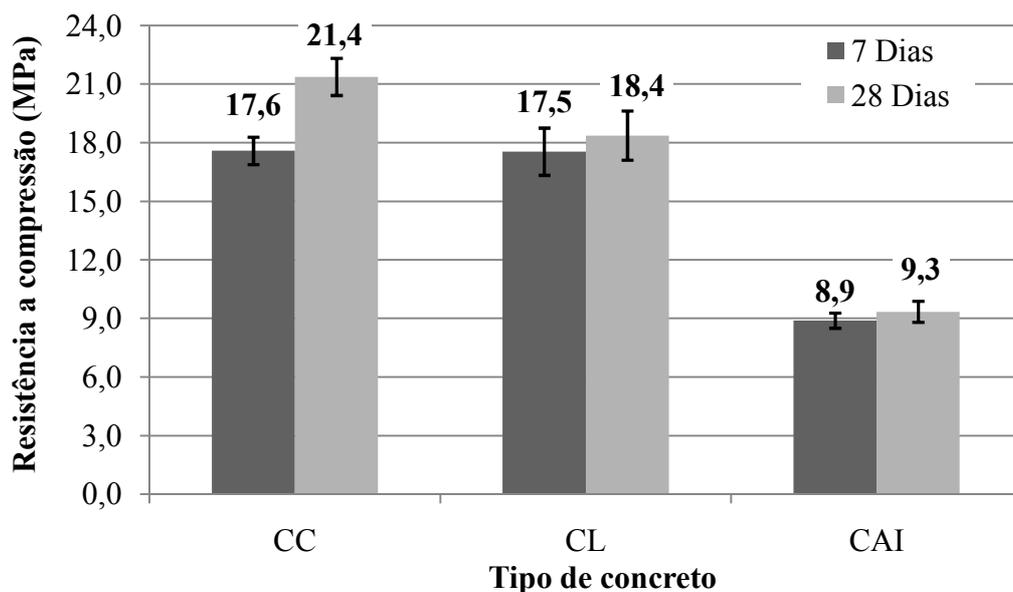


Figura 6.4 - Módulo de elasticidade dos concretos.

Os resultados apresentados na Figura 5.4 mostram que, embora constituídos do mesmo material, o CAI mostrou um módulo de elasticidade um pouco menor que o do CC. Tal observação se deve ao fato da presença de poros na estrutura do CAI, pois, quando submetido a um esforço compressivo, a estrutura mais fragilizada pela presença dos poros se rompe a valores de tensão mais baixos, não permitindo a reestruturação. Em relação ao CL, o baixo módulo de elasticidade é reflexo do tipo de agregado utilizado, pois sendo a argila expandida um agregado de superfície arredondada, diferentemente da brita, não ocorre a concentração de tensão nos agregados, diminuindo assim seu módulo de elasticidade.

#### 5.2.5. Resistência à compressão

Os resultados obtidos para a resistência à compressão dos concretos, apresentam-se nas Figura 5.5.



**Figura 6.5** - Resistência à compressão dos concretos.

Os resultados à compressão dos concretos mostram que o concreto convencional tem aos 7 dias uma resistência de 17,6 MPa e aumenta em 21,52% aos 28 dias, chegando a 21,4 MPa. O CL apresenta aos 7 dias uma resistência muito próxima ao CC, com 17,5 MPa, porém seu acréscimo em 28 dias é inferior, chegando a 18,4 MPa. O concreto utilizando aditivo incorporador de ar não chega a resistência desejada de 15MPa, apresentando resistência inicial de 8,9 MPa e atingindo aos 28 dias à uma resistência de 9,3 MPa, tendo um acréscimo de apenas 5,1%.

Avaliando o comportamento do CL, em relação ao CC tem-se que estes apresentaram uma resistência semelhante para 7 dias, entretanto, o aumento da resistência do CL de 7 para 28 dias foi menos pronunciado que o do CC. Isto porque, para o concreto leve, a ruptura normalmente não ocorre devido à diferença entre as deformações dos agregados e da pasta de cimento, mas devido ao colapso da argamassa, muitas vezes com origem em microfissuras nos agregados e a linha de fratura atravessa os agregados.

Já em relação ao resultado obtido para as análises de resistência à compressão do CAI em relação ao CC, há uma perceptível queda da resistência, tanto para 7 quanto para 28 dias. A queda na resistência é atribuída ao aumento do índice de vazios ocasionada pela aplicação do aditivo incorporador de ar.

### 5.3. Caracterização dos protótipos mistos

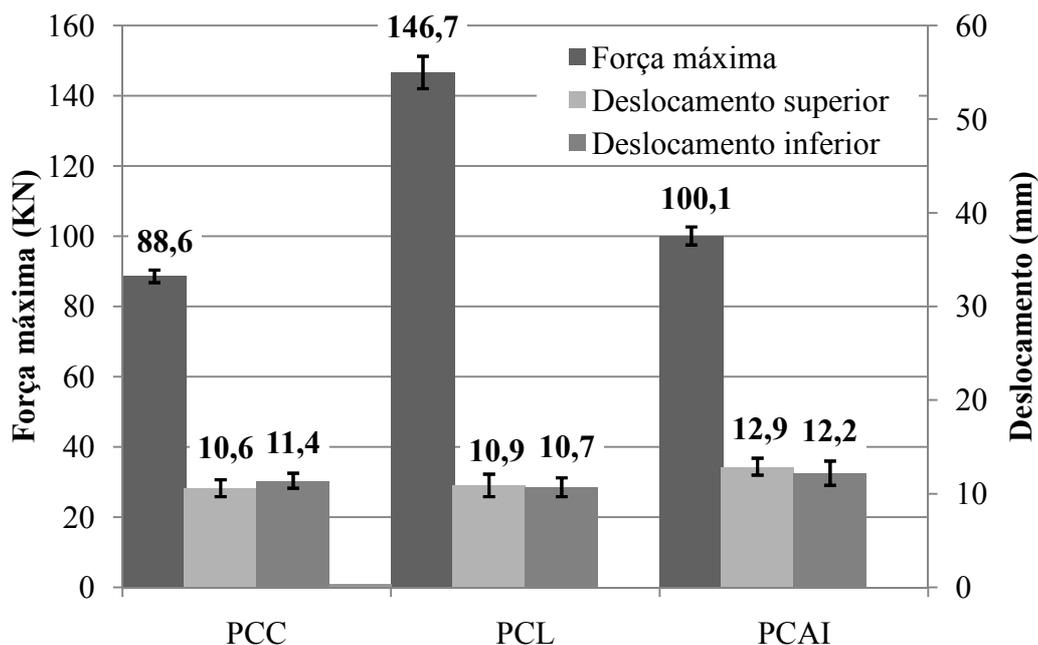
#### 5.3.1. Análise da aderência entre os componentes

Na Tabela 5.3, são apresentados os valores de carga máxima aplicada no núcleo de concreto antes da perda de aderência, sua tensão correspondente, além dos valores de deslocamento superior medido pelo equipamento de ensaio e o deslocamento inferior medido manualmente. Para facilitar a visualização e interpretação, as médias dos resultados estão representadas graficamente na Figura 5.6.

**Tabela 6.3** - Resultados do ensaio de carga aplicada no núcleo de concreto dos protótipos.

Protótipo	Carga máxima (KN)	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento superior (mm)	Deslocamento inferior (mm)	Varição de deslocamento (mm)
PCC-1	89,35	11,38	10,1	10,5	0,4
PCC-2	86,15	10,97	9,8	11,0	1,2
PCC-3	90,55	11,53	11,0	11,5	0,5
PCC-4	88,48	11,27	11,6	12,4	0,8
<b>Média</b>	<b>88,63 (± 1,8)</b>	<b>11,29 (± 0,2)</b>	<b>10,6 (± 0,9)</b>	<b>11,4 (± 0,8)</b>	<b>0,7 (± 0,4)</b>
PCL-2	143,35	18,25	9,2	9,6	0,4
PCL-2	148,88	18,96	11,3	10,1	1,2
PCL-3	142,31	18,12	11,0	11,1	0,1
PCL-4	152,08	19,36	12,2	11,9	0,3
<b>Média</b>	<b>146,66 (± 4,63)</b>	<b>18,67 (± 0,59)</b>	<b>10,9 (± 1,2)</b>	<b>10,7 (± 1,0)</b>	<b>0,5 (± 0,5)</b>
PCAI-1	98,68	12,56	13,1*	13,2	0,1
PCAI-2	98,24	12,51	11,8*	11,0	0,8
PCAI-3	103,86	13,22	12,7	12,8	0,1
PCAI-4	99,71	12,70	13,9*	13,8	0,1
<b>Média</b>	<b>100,12 (± 2,57)</b>	<b>12,75 (± 0,33)</b>	<b>12,9 (± 0,9)</b>	<b>12,2(± 1,3)</b>	<b>0,4 (± 0,3)</b>

\* Valores obtidos manualmente.



**Figura 6.6** - Representação gráfica das médias dos resultados do ensaio de carga aplicada no núcleo de concreto dos protótipos.

Com os resultados apresentados é possível verificar que a média das cargas máximas, aplicadas aos protótipos preenchidos com concreto utilizando argila expandida (PCL) é 65% maior que os protótipos preenchidos com concreto convencional (PCC) e 47% maior que os preenchidos com concreto com ar incorporado (PCAI). Em relação aos deslocamentos finais superiores e inferiores, é possível verificar que em todos os protótipos há uma variação bem pequena entre eles, da ordem de 1 mm ou inferior. Considerando que os deslocamentos inferiores foram obtidos manualmente, essa variação de um 1 mm pode ser desconsiderada, sendo assim, constata-se que o núcleo deslocou-se por inteiro sem haver compressão. Vale ressaltar que os resultados para o deslocamento, tanto superior quanto o inferior dos protótipos PCAI-1, PCAI-2 e PCAI-4, foram obtidos apenas manualmente, devido a falhas técnicas no momento de obtenção dos deslocamentos durante os ensaios.

Na Figura 5.7, estão representados os gráficos *força x deslocamento* de cada protótipo para a análise da influência do tipo de concreto na aderência em pilares mistos preenchidos, uma vez que todas as demais variáveis foram mantidas constantes.

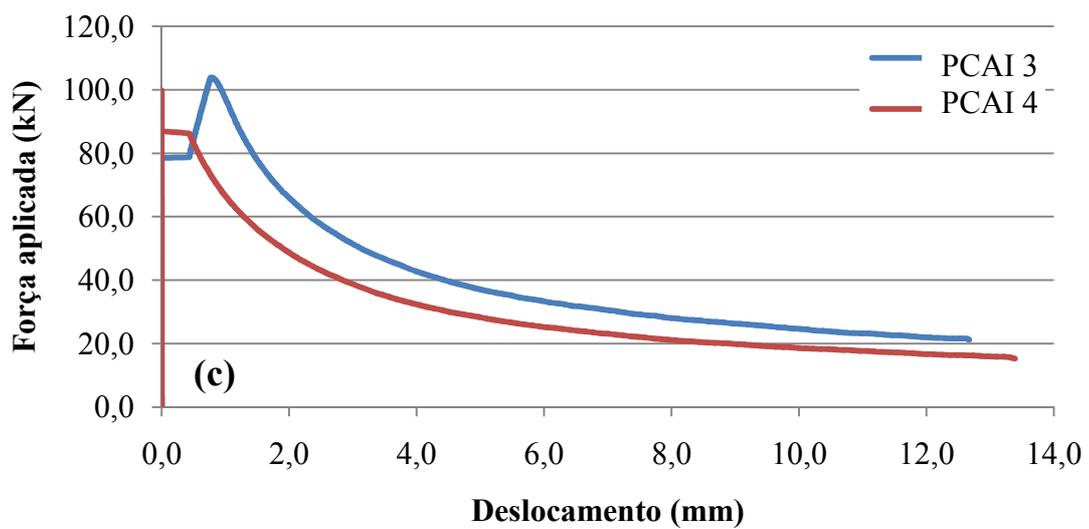
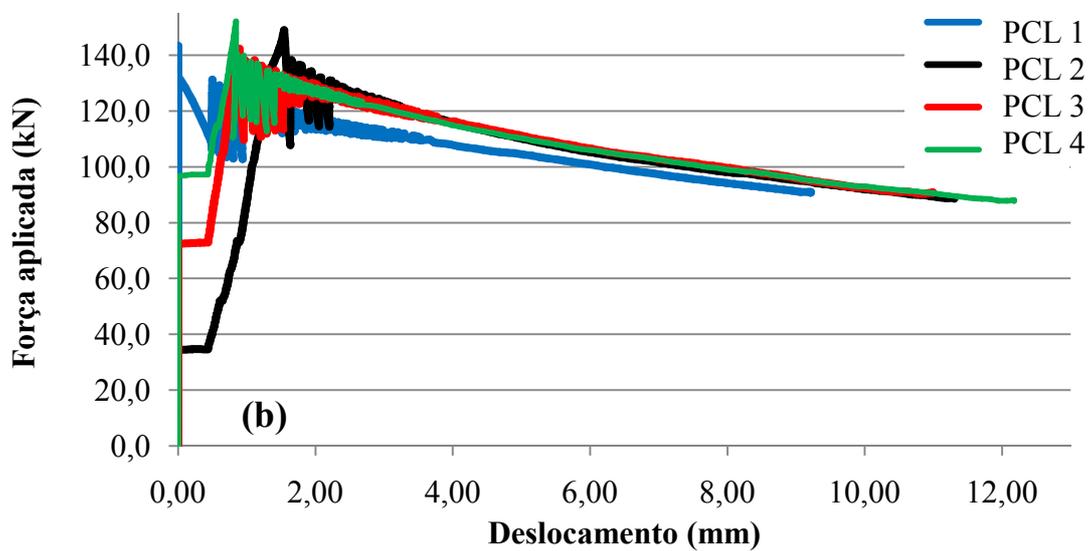
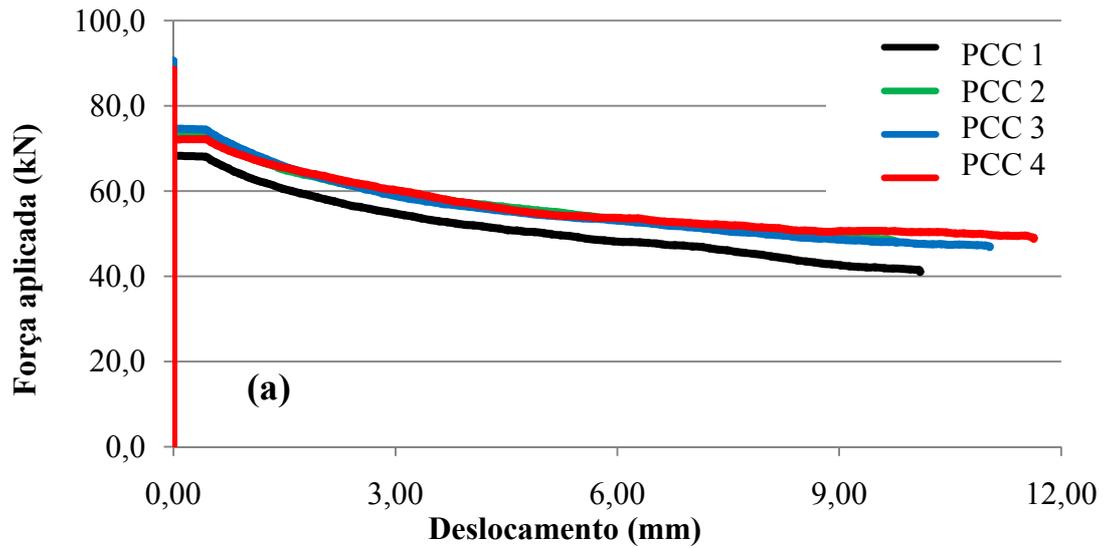


Figura 6.7 - Gráficos força x deslocamento para os protótipos (a)PCC, (b)PCL e (c)PCAI.

Analisando o comportamento dos protótipos PCC é possível observar que, para os quatro protótipos, há um aumento de carga sem apresentar deslocamento do núcleo de concreto, até se atingir o valor de carga máxima. Alcançada a carga máxima há uma redução brusca da carga aplicada sem deslocamento mensurável, o que caracteriza a perda de aderência por adesão entre o aço e o concreto. Em seguida ocorre a aderência mecânica identificada pela manutenção da carga durante um curto deslocamento (em média 0,3mm). Por fim, ocorre um decréscimo contínuo da carga aplicada com aumento do deslocamento, evidenciando a completa perda de aderência entre os componentes do protótipo misto.

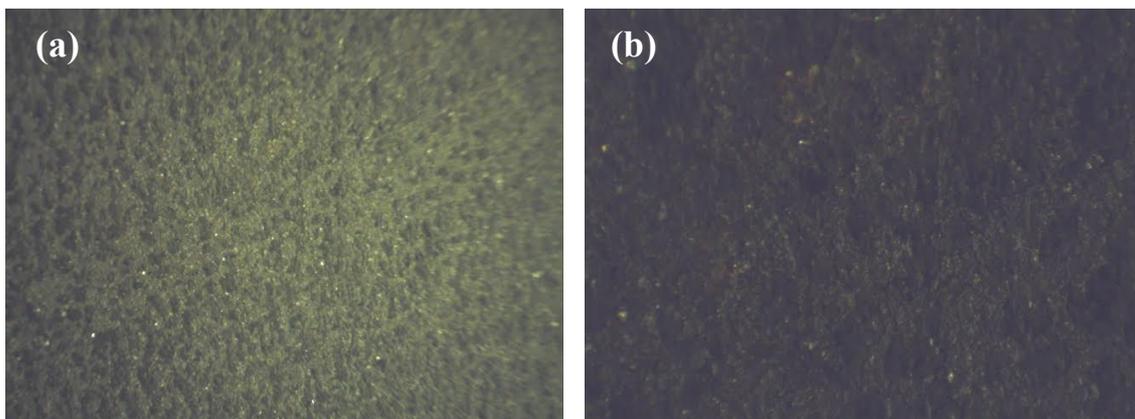
Em relação ao PCAI, verifica-se que houve um pequeno deslocamento antes de se atingir a carga máxima, ou seja, a perda de aderência por adesão ocorre abaixo da carga máxima aplicada. Em seguida, há um aumento da carga até se atingir a carga máxima e posteriormente há o decréscimo acentuado da carga com aumento do deslocamento, isso significa que a aderência mecânica predomina sobre a aderência por adesão. Este resultado indica que houve melhor aderência em relação ao PCC, na interface aço concreto, devido a maior rugosidade da superfície do concreto, derivada da incorporação de ar, aumentando o coeficiente de atrito, o que leva a um acréscimo na tensão máxima. Somado a isto quando o núcleo de concreto é submetido a uma compressão axial dentro do tubo, o CAI, com menor módulo de elasticidade em relação ao CC, tende a se expandir radialmente, contribuindo assim para uma maior aderência mecânica em um primeiro momento, seguido de desprendimento da parede do tubo após a carga máxima.

Quanto aos protótipos PCL, é possível observar um comportamento um pouco diferente aos apresentados nos demais. Todas as curvas apresentadas na Figura 5.7c, indicam uma perda de aderência por adesão antes de se atingir a carga máxima aplicada ao núcleo de concreto, mostrando um comportamento de aderência mecânica após essa carga máxima, ou seja, posteriormente à perda por adesão, ocorre a aderência mecânica e por atrito, em um intervalo maior que os demais, o que confirma a melhor resistência na interface. Esta melhor tensão de aderência em perfil preenchido com concreto leve se dá pelo fato da grande expansibilidade da argila, o que não ocorre nos agregados utilizados nos concretos dos protótipo PCC e PCAI. Também há aqui o efeito do módulo de elasticidade do preenchimento de concreto, pois, sendo o CL o de menor módulo de elasticidade dentre os três tipos de preenchimento, este irá tender a ter uma maior deformação radial que os demais, exigindo assim uma maior tensão para promover a perda de aderência.

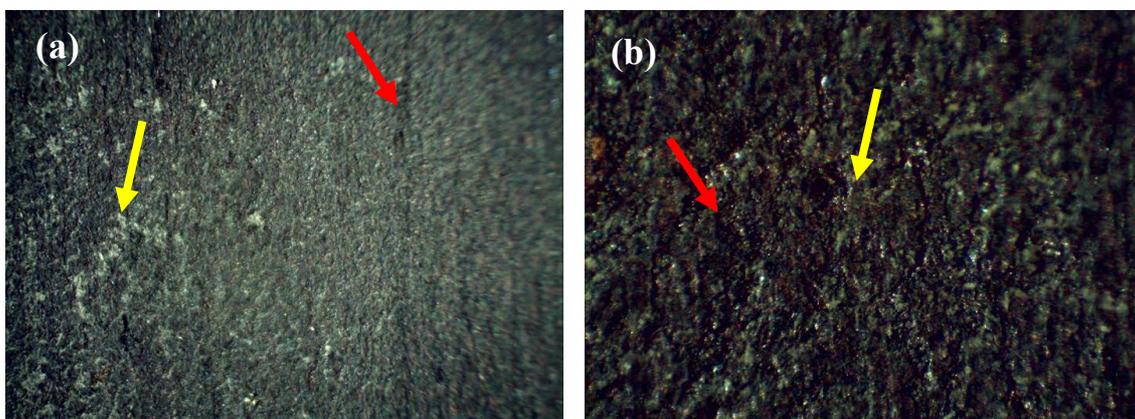
Vale ressaltar que, em relação as leituras dos relógios comparadores instalados ao longo da parede do perfil de aço, não foram identificadas variações na seção transversal, o que significa que não houve deformações radiais expressivas no tubo de aço.

### 5.3.2. Microscopia Ótica

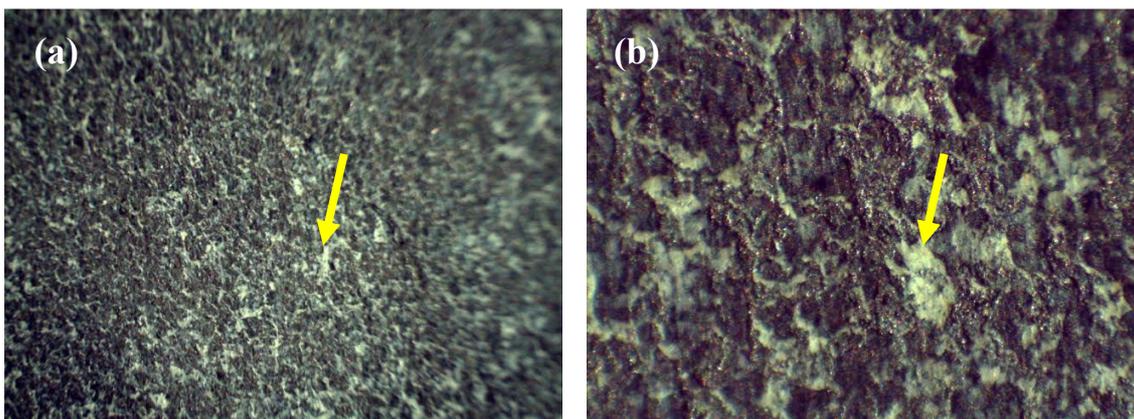
Na Figuras 5.8 são apresentadas as imagens das amostras retiradas de perfis de aço sem preenchimento de concreto (PSC), para utilização do mesmo como padrão na análise dos demais, enquanto que nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, são mostradas, respectivamente, as imagens das amostras retiradas dos protótipos PCC, PCAI e PCL, após a realização dos ensaios de carga aplicada no núcleo de concreto. Todas as amostras são apresentadas com ampliações de 10x e 45x.



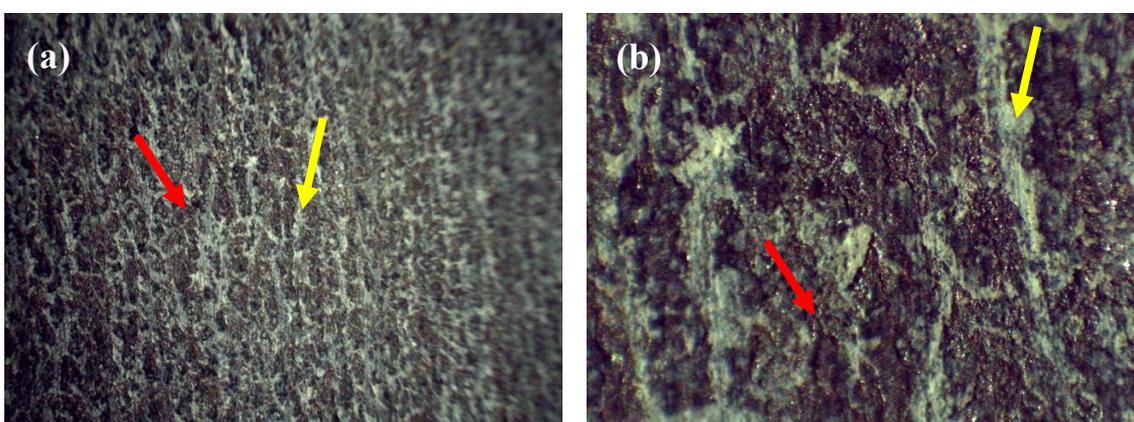
**Figura 6.8** - Imagens de microscopia ótica das amostras do PSC, com aumentos de (a)10x e (b)45x.



**Figura 6.9** - Imagens de microscopia ótica das amostras do PCC, com aumentos de (a)10x e (b)45x.



**Figura 6.10** - Imagens de microscopia ótica das amostras do PCAI, com aumentos de (a)10x e (b)45x.



**Figura 6.11** - Imagens de microscopia ótica das amostras do PCL, com aumentos de (a)10x e (b)45x.

As principais diferenças entre as imagens mostradas são em relação à quantidade de concreto residual aderido à parede do aço (destacado em amarelo) e a presença de ranhuras nas mesmas (destacadas em vermelho).

Como pode ser observado na Figura 5.9, é notória a presença de resíduos do concreto pela existência de pequenos pontos de pigmentação acinzentada, que não eram notados nas imagens da Figura 5.8, por não haver concreto nesta última. Somado a isso, há ainda a presença de pequenas ranhuras, melhor identificadas na Figura 5.9 (a), derivada do escorregamento do concreto durante o ensaio.

Comparando a Figura 5.10 com as imagens das Figuras 5.8 e 5.9, observa-se que a presença de concreto aderido à parede do aço é ainda mais acentuada, o que corrobora os resultados apresentados no item 5.3.1, onde foi evidenciada uma maior aderência entre os componentes em relação ao PCC. Em relação à presença de ranhuras, estas não são observadas na Figura 5.10, o que pode estar relacionado ao comportamento da curva *força x*

*deslocamento* do PCAI (Figura 5.7 (b)), onde se pode verificar uma menor resistência ao escorregamento, ou seja, o preenchimento do PCAI apresentou uma boa aderência, porém uma baixa reação ao confinamento.

Por fim, ao se analisar as imagens da Figura 5.11, é possível identificar, em toda imagem, uma alta concentração de concreto residual aderido à parede do aço, como também a presença de ranhuras mais acentuadas que nos demais protótipos, o que evidencia que o concreto leve apresenta melhor aderência ao perfil fino de aço e uma maior reação ao confinamento, em relação aos outros concretos.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos nas análises e ensaios de caracterização dos diferentes tipos de concreto, realizados e apresentados ao longo do trabalho, foi possível concluir que:

- A utilização de argila expandida em substituição a brita, como agregados dos concretos resulta em um concreto com menor massa específica, o que permite a obtenção de estruturas mais leves;
- A incorporação de ar ao concreto, a partir da utilização de aditivo incorporador de ar, reduz a resistência do concreto devido ao aumento do índice de vazios;
- A substituição da brita pela argila expandida nos concretos, leva a uma redução da resistência à compressão do mesmo, devido a menor resistência a compressão do novo agregado utilizado;
- O aumento do índice de vazios causado pela aplicação de um aditivo incorporador de ar aumenta, significativamente, a absorção de água do concreto. Aumento este, que também pode ser observado ao se utilizar um agregado expansivo que tem maior capacidade de absorção de água.
- Os poros obtidos pela incorporação de ar não levaram a formação de uma rede de percolação, o que contribui para uma maior durabilidade e resistência térmica do concreto;
- Em relação ao módulo de elasticidade, o valor deste sofre uma redução derivada tanto da utilização de um agregado de superfície arredondada, que diminui a concentração de tensões no concreto, quanto da incorporação de poros, que fragiliza a estrutura impossibilitando a reestruturação do concreto após a aplicação de uma força de compressão.

Os resultados obtidos a partir das técnicas utilizadas para análise de aderência, ensaio de compressão no núcleo de concreto e microscopia ótica, realizadas nos perfis finos de aço preenchidos com os três diferentes tipos de concretos permitem concluir que:

- A aderência do concreto ao aço possui parcelas de contribuição da aderência por adesão e da aderência mecânica. A primeira pôde ser observada pelo aumento da carga aplicada sem deslocamento do núcleo, enquanto a segunda é evidenciada pela

manutenção da carga, enquanto há variação do deslocamento, após a aplicação da carga máxima;

- O perfil tubular preenchido pelo concreto leve apresentou o melhor desempenho em relação a aderência entre os componentes. Isto oriundo da maior contribuição da aderência mecânica e melhor resistência na interface, que por sua vez, foram ocasionadas pela expansibilidade da argila expandida utilizada como agregado e menor módulo de elasticidade.
- Não houve deformação radial mensurável nos perfis mistos, uma vez que não foram observadas leituras de deslocamento nos relógios comparadores instalados ao longo do perfil.

Assim sendo, espera-se que os resultados obtidos neste trabalho contribuam para o desenvolvimento de novos trabalhos referentes a utilização de perfis tubulares de aço preenchidos com concreto, buscando estruturas mais leves e com melhores comportamentos na interface aço concreto. Além disso, contribui também para a realização de estudos utilizando perfis semelhantes, com a utilização de conectores, com o objetivo de se melhorar, ainda mais a aderência entre os componentes. Há ainda a possibilidade da reprodução do presente trabalho utilizando diferentes tipos de concreto e/ou aços estruturais na busca de estruturas ainda mais eficientes.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. H. F. Estudo Numérico de um Dispositivo de Transferência de Cargas em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_.NBR NM 30 – Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR NM 45 – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_.NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_.NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_.NBR 5735 – Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_.NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_.NBR 5739 – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_.NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_.NBR 6355 – Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_.NBR 7211 – Agregados para concretos - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_.NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_.NBR 8522 – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_.NBR 8800 - Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_.NBR 9939 – Agregado – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_.NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_.NBR 12821 – Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_.NBR 14762 – Dimensionamento de estruturas constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

BRAGA, A. C. G., FERREIRA, W. G. Pilares mistos de aço-concreto e comparativo de custo com pilares de aço e pilares de concreto armado. Revista Escola de Minas, 2001, vol. 64, n. 4, p. 407-414.

CALIXTO, J. M.; GOMES, L. C.; PIMENTA, R. J.; MONTEIRO, R. C.; MELO, C.; ROCHA, G. G. Concreto Estrutural Leve: Exemplo de aplicação. IBRACON, 2001, 14p.

CHAVES, I. A. Viga Mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

CINEXPAN. Argila Expandida. Disponível em <<http://www.cinexpan.com.br/argila-expandida-cinexpan.html>>. Acesso em 23/01/2016.

CEDERWALL, K.; ENGSTROM, B.; GRAUERS, M. High-strength concrete used in composite columns. In: HESTER, W. T.; ed. High-strength concrete: second international symposium. Detroit, ACI, 1990, p. 195-214.

DA SILVA, R. D. Estudo da aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

DE NARDIM, S. Estudo teórico experimental de pilares mistos compostos por tubo de aço preenchidos com concreto de alta resistência. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

DOLCH, W. L. Air-Entraining Admixtures. Concrete admixtures handbook: properties, science and technology. 2nd ed. New Jersey: Noyes Publications, 1995, p. 518-557.

FIGUEIREDO, J. M. B. Projeto e construção de pilares mistos Aço-concreto. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

GIAKOUMELIS, G E LAM, D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. Journal of Constructional Steel Research, 2004, n. 60, p. 1049-1068.

HAQUE, M. N.; AL-KHAIAT, H.; KAYALI, O. Strength and Durability of Lightweight Concrete. Cement & Concrete Composites (26) p. 307-314, 2004.

- JOHANSSON, M., GYLLTOFT, K. Structural behavior of slender circular steel-concrete composite columns under various means of load application. *Steel and Composite Structures*, vol. 1, n. 4, p. 393-410, 2002.
- JOHANSSON, M. Composite action in connection regions of concrete-filled steel tube columns. *Steel and composites Structures*, v. 3, n. 1, Feb, 2003.
- KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PARANAESE, W. C. *Design and control of mixtures*. 14th ed. Skokie: PCA, 2003.
- LI, G., ZHAO, X., CHEN, L. Improve the strength of concrete-filled steel tubular columns by the use of fly ash. *Cement and concrete research*, Pergamon, v.33, p. 733-739, 2003.
- METHA, P. K. & MONTEIRO, P. J. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. (2° ed.). IBRACON, 2014.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto* (2° ed.). São Paulo: Pini, 1982.
- OLIVEIRA, W. L. A. *Análise teórico - experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- PACHECO, J., BILESKY, P., MORAIS, T. R., GRANDO, F., HELENE, P. Consideração sobre o módulo de elasticidade do concreto. *Anais do 56° Congresso Brasileiro de Concreto*. Natal: IBRACON, 2014.
- PEIXOTO, R. A. F. *Desenvolvimento de placas de concreto leve de argila expandida aplicada a coberturas de instalações para produção animal*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- PFEIL, W., PFEIL, M. *Estruturas de Aço*. Rio de Janeiro, 2009.
- QUEIROZ, G., PIMENTA, R. J., MATA, L. A. C. *Elemento das estruturas mistas aço-concreto*. Belo Horizonte: Editora O Lutador, 2001. 336p.
- RIBEIRO, C. C., PINTO, J. D., STARLING, T. *Materiais de construção civil* (2° ed.). Belo Horizonte: UFMG, 2002.
- ROEDER, C. W., CAMERON, B., BROWN, C. B. Composite action in concrete filled tubes. *Journal Of Structural Engineering*, v. 125, n. 5, p. 477-484, 1999.
- ROSSIGNOLO, J. A. *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. São Paulo: Pini, 2009.
- SHANMUGUM, N.E., LAKSSHMI, B. State of the art report on steel-concrete composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*. v.57, n. 10, p.1041 - 1080. Oct, 2001.

SILVA, E. L.; PIERIN, I.; SILVA, V. P. Estruturas compostas por perfis formados a frio – dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, CBCA, 2014.

SOARES, A. F. Software Especialista para Dosagem de Misturas Cimentícias. Monografia. CEFET-MG Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2009.

V & M do BRASIL, Imagination & Inspiração, Coletânea de estruturas tubulares. Belo Horizonte: Taimóios Editora Gráfica Ltda, 2008.

VIRDI, K. S., DOWLING, P. J. Bond strength in concrete filled steel tubes. IABSE - International Association for Bridge and Structural Engineering, n.03, p. 125-137, August, 1980.