



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto



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



Juliana Fadini Natalli

Desempenho do Concreto Leve em Seções Mistas

Ouro Preto
2017

Juliana Fadini Natalli

Desempenho do Concreto Leve em Seções Mistas

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto
Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho

Ouro Preto
2017

N272d

Natalli, Juliana Fadini .

Desempenho do concreto leve em seções mistas [manuscrito] / Juliana Fadini Natalli. - 2017.

97f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.

Coorientador: Prof^ª. Dr^ª. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

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

Área de Concentração: Construção Metálica.

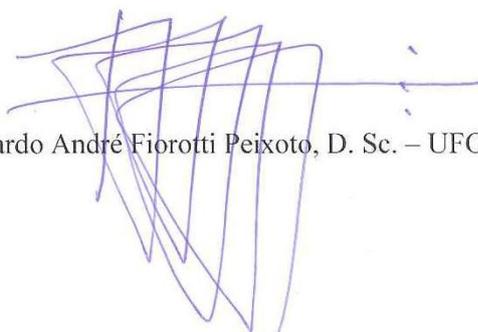
1. Concreto leve. 2. Estruturas mistas. 3. Perfis tubulares. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.014.2

DESEMPENHO DO CONCRETO LEVE EM SEÇÕES MISTAS

AUTORA: JULIANA FADINI NATALLI

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 10 de novembro de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, D. Sc. – UFOP (Presidente)



Prof. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D. Sc. – UFOP



Prof. Ana Amélia Oliveira Mazon, D. Sc. – UFSJ



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

AGRADECIMENTOS

À Deus, por seu infinito amor, por sempre me iluminar e me dar forças e coragem para superar novos desafios.

Aos meus amados pais, Roseli e Jorge, pelo imenso apoio, amor, dedicação e incentivo. Vocês são os meus maiores exemplos! Obrigada por sempre acreditarem em mim e estarem tão presentes na minha vida.

Aos meus avós, meus anjos da guarda, que nunca mediram esforços para me ajudar. Obrigada pelas orações, pela presença contínua. Vocês são a razão da minha vida!

À minha irmã Marina, por ser a minha melhor amiga e confidente. À toda minha família e aos amigos, em especial à Larissa, Gaby e Ana, que apesar da distância, fizeram-se presentes em cada momento.

À minha República Artigo de Luxo, por ser a minha família, por ter me dado tanto suporte durante à minha graduação e no período do mestrado.

Aos meus orientadores, prof. Ricardo e prof. Arlene, pela amizade, pela valiosa orientação e pelos conhecimentos transmitidos, sem os quais esse trabalho não seria possível.

Ao meu estimado Grupo de Pesquisa Reciclos/CNpq e aos meus colegas de trabalho, em especial Zé, Humberto, Keoma, Júlia, Wanna, prof. Guilherme, prof. Ricardo e ao nosso brilhante técnico Juninho. Foi um privilégio enorme trabalhar com vocês! Obrigada por todo o auxílio, apoio e risadas. Ao Laboratório de Estruturas da UFOP, pelo apoio técnico, suporte e muita amizade.

À todos que contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho, o meu muito obrigada!

RESUMO

Os sistemas mistos passaram a ser uma nova alternativa para a associação aço-concreto nas edificações desde o início do século XX. A combinação de perfis de aço preenchidos com concreto, compondo pilares, tornou-se uma forma de intensificar as vantagens dos dois materiais aliando utilidades técnicas e estruturais. No entanto, para que esses benefícios sejam verificados, é necessário que haja íntima interação aço-concreto de forma a garantir a transferência de esforços e a compatibilização de deformações. Dessa forma, este estudo analisa a aderência e o efeito de confinamento em seções mistas compostas por perfis tubulares de parede fina, preenchidos com três diferentes tipos de concreto: leve sem adição (utilizado como referência), leve com adição de expansor, e, leve com agente incorporador de ar. Para tanto, foram confeccionados 12 protótipos mistos, utilizando perfis finos de aço, com diâmetro externo de 100 mm e espessura de 2 mm, preenchidos com concretos leves executados com argila expandida nacional. Os modelos foram submetidos a uma investigação do comportamento de seus núcleos de preenchimento durante o período de cura, objetivando-se verificar o desempenho dos concretos quanto à expansão/contração durante o tempo especificado. Além disso, foram realizados testes de cisalhamento, análise morfológica por microscopia óptica nas interfaces das seções, ensaios de resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto e à seção mista e caracterizações mecânicas dos concretos produzidos. A partir dos resultados, constatou-se que a variação dimensional gerada pelo concreto expansivo durante o seu período de endurecimento induz um efeito de confinamento nas paredes do tubo de aço, proporcionando melhora da adesão na interface e bom desempenho dos protótipos quando submetidos a cargas axiais. Quanto aos núcleos de concreto dosados com incorporador de ar, verificou-se que o seu menor módulo de elasticidade e suas irregularidades superficiais contribuíram para a manifestação da aderência mecânica, por atrito e para um elevado grau de confinamento.

Palavras-chaves: Concreto leve, aditivo expansor, aditivo incorporador de ar, aderência, confinamento.

ABSTRACT

The concrete-filled steel tube (CFT) systems have become a new solution for steel-concrete association in buildings since the beginning of the 20th century. The combination of steel profiles filled with concrete, composing pillars, is a way of enhancing the advantages of the two materials by combining their technical and structural advantages. However, to verify these benefits, a close steel-concrete interaction is necessary in order to ensure the transfer of loadings and the compatibility of deformations. Thus, this study analyses the adhesion and confinement effects in mixed sections composed of thin-walled tubular steel profiles filled with three different types of concrete: lightweight without any admixture (used as reference), lightweight with expansive agent, and lightweight with air-entraining admixture. For this purpose, 12 prototypes were made using thin steel profiles, with an external diameter of 100 mm and a thickness of 2 mm, filled with lightweight concretes manufactured with Brazilian expanded clay. Initially, the specimens investigated regarding the behavior of their filling cores during the curing period, aiming to verify the performance of concretes in relation to expansion / contraction during the specified time. In addition, the following tests were performed: shear tests; optical microscopy at the sections' interfaces; compressive strength with load applied to the concrete core and the mixed section; and physical characterization of concrete produced. From the results, it was verified that the expansion generated by the expansive concrete during its hardening period induces a pre-effect of confinement in the walls of the steel tube, providing improvement of the adhesion at the interface and good performance of the prototypes when submitted to the axial loads. As for the concrete with entrained air, it was verified that its smaller modulus of elasticity and its surface irregularities contributed to the appearance of increased mechanical and frictional adhesion and to a high degree of confinement.

Keywords: Concrete-filled steel tube, adhesion, confinement, expansive agent, air-entraining admixture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de concreto leve: (a) com agregados leves, (b) com incorporação de ar, (c) sem finos.....	17
Figura 2.2 - Aspecto da argila expandida.	19
Figura 2.3 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da superfície externa de uma argila expandida.	19
Figura 2.4 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da estrutura interna de uma argila expandida.	19
Figura 2.5 - Regiões de fraturas, indicadas por setas, dos concretos com agregados leves (à esquerda) e com agregados convencionais (à direita).....	21
Figura 2.6 - Módulo de elasticidade do concreto convencional, leve e com ar incorporado.	22
Figura 2.7 - MEV da zona de transição interfacial de um concreto com xisto expandido.	24
Figura 2.8 - ZTI de um concreto com argila expandida.	25
Figura 2.9 - Penetração da pasta de cimento através dos poros do agregado.	25
Figura 2.10 - Natureza química básica dos surfactantes.....	27
Figura 2.11 - Mecanismo de ação do AIA.....	28
Figura 2.12 - Retração e expansão de um concreto convencional e de um concreto expansivo.	29
Figura 2.13 - Seções transversais mais utilizadas em pilares mistos preenchidos.....	32
Figura 2.14 - Componentes das ações de cálculo e propriedades geométricas para o cálculo da tensão de cisalhamento na interface.	33
Figura 2.15 - Curva tensão de cisalhamento vs escorregamento.	34
Figura 2.16 - Mecanismo de transferência da aderência por adesão.....	35
Figura 2.17 - Mecanismo de transferência da aderência mecânica.	36
Figura 2.18 - Mecanismo de transferência da aderência por atrito.	37
Figura 2.19 - Tensões no núcleo de concreto e no tubo metálico: σ_c – tensão de compressão longitudinal no concreto; σ_{al} – tensão de compressão longitudinal no aço; σ_r – tensão no núcleo de concreto; σ_{ah} – tensão no perfil de aço.	38
Figura 2.20 - Influência da forma da seção transversal no confinamento de pilares preenchidos.....	38
Figura 3.1 - Agregados leves nacionais: (a) CINEXPAN 1506 e, (b) CINEXPAN 2215.....	41
Figura 3.2 - Dimensões dos tubos de aço: a) seção transversal; b) seção longitudinal dos tubos utilizados para a investigação da expansão/contração do núcleo de concreto; c) seção longitudinal dos tubos usados em ensaios de resistência à compressão e testes de cisalhamento.	44
Figura 3.3 - (a) Argamassa com fator água/cimento de 0,48 e (b) argamassa com fator água/cimento de 0,74.	45
Figura 3.4 - Produção dos protótipos para a análise da variação volumétrica: a) moldagem; b) aspecto da membrana antes de ser fechada por um nó; c) remoção do excesso de material da membrana.	46
Figura 3.5 - Posicionamento dos extensômetros nos tubos: a) Face externa; b) Face interna.	48
Figura 3.6 - Sistema para a investigação do efeito de expansão/contração do núcleo de concreto.	48
Figura 3.7 - Detalhe da região sem preenchimento na extremidade inferior do protótipo misto.....	49
Figura 3.8 - a) Protótipos mistos usados para os ensaios de resistência à compressão; b) Detalhe da roseta instalada na parede externa do tubo.	50

Figura 3.9 - Protótipos da investigação da expansão/contração dos núcleos de concreto.....	55
Figura 3.10 - Montagem e instrumentação para o teste de cisalhamento.....	57
Figura 3.11 - Montagem e instrumentação para o ensaio de resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto.	58
Figura 3.12 - Montagem e instrumentação para o ensaio de resistência à compressão com aplicada à seção mista.	60
Figura 4.1 - Massa específica e massa unitária dos agregados.....	62
Figura 4.2 - Absorção de água (%) dos agregados graúdos.	63
Figura 4.3 - Resistência à compressão das argamassas.	65
Figura 4.4 - Variação volumétrica das argamassas dosadas com expansor.	66
Figura 4.5 - Variação volumétrica das argamassas dosadas com LAS.	66
Figura 4.6 - Relação entre resistência à compressão e expansibilidade para diferentes dosagens de expansor.	67
Figura 4.7 - Relação entre resistência à compressão e expansibilidade para diferentes dosagens de LAS.	68
Figura 4.8 - Resistência à compressão dos concretos leves.....	69
Figura 4.9 - Absorção de água e índice de vazios.....	70
Figura 4.10 - Massa específica das variações de concreto.....	72
Figura 4.11 - Módulos de elasticidade.	73
Figura 4.12 - Deformação ϵ_1 interna x tempo de cura dos núcleos de preenchimento.	74
Figura 4.13 - Deformação ϵ_2 interna x tempo de cura dos núcleos de preenchimento.	75
Figura 4.14 - Deformação ϵ_1 externa x tempo de cura dos núcleos de preenchimento.	75
Figura 4.15 - Deformação ϵ_2 externa x tempo de cura dos núcleos de preenchimento.	75
Figura 4.16 - Força x deslocamento do núcleo de concreto do protótipo PCSA.....	78
Figura 4.17 - Força x deslocamento do núcleo de concreto do protótipo PCEX.....	78
Figura 4.18 - Força x deslocamento do núcleo de concreto do protótipo PCLAS.....	79
Figura 4.19 - Microscopia óptica da amostra do PCC (Rodrigues, 2016), com aumentos de (a)10x e (b)45x.....	80
Figura 4.20 - Microscopia óptica da amostra do PCSA, com aumentos de (a)10x e (b)45x.....	80
Figura 4.21 - Microscopia óptica da amostra do PCEX, com aumentos de (a)10x e (b)45x.....	81
Figura 4.22 - Microscopia óptica da amostra do PCLAS, com aumentos de (a)10x e (b)45x.....	81
Figura 4.23 - Resistência à compressão: a) dos núcleos de concreto de preenchimento dos protótipos mistos; b) dos concretos leve.	83
Figura 4.24 - Diagrama força x deformação ϵ_1 dos protótipos mistos.	84
Figura 4.25 - Diagrama força x deformação ϵ_2 dos protótipos mistos.	84
Figura 4.26 - Resistência à compressão: a) das seções mistas; b) dos concretos leves.	86
Figura 4.27 - Diagrama força x deformação ϵ_1 dos protótipos mistos.	87
Figura 4.28 - Diagrama força x deformação ϵ_2 dos protótipos mistos.	88
Figura 4.29 - Modo de falha dos tubos de aço.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Critérios normativos para a classificação de concreto leve segundo valores de massa específica.....	20
Tabela 2.2 - Valores mínimos de resistência à compressão em função da massa específica para concreto leve estrutural.....	21
Tabela 3.1 - Propriedades físicas e químicas do CPIV-32RS.	42
Tabela 3.2 - Dados técnicos e características do aditivo expensor MC-Quellmittel.....	43
Tabela 3.3 - Materiais utilizados por batelada das argamassas.....	45
Tabela 3.4 - Dosagem do traço das argamassas.	45
Tabela 3.5 - Traços dos concretos executados.	47
Tabela 3.6 - Identificação e características dos protótipos para a investigação da expansão/contração do núcleo de concreto.	56
Tabela 3.7 - Identificação e características dos protótipos para a investigação dos testes de cisalhamento.....	57
Tabela 3.8 - Identificação e características dos protótipos para o ensaio de resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto.	59
Tabela 3.9 - Identificação e características dos protótipos para o ensaio de resistência à compressão com carga aplicada à seção mista.....	60
Tabela 4.1 - Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados.....	62
Tabela 4.2 - Composição elementar do aditivo expensor.....	64
Tabela 4.3 - Perdas de massa dos concretos leves.	71
Tabela 4.4 - Propriedades das seções mistas.....	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	Concreto leve	16
2.1.1	Definições	16
2.1.2	Histórico	17
2.1.3	Agregado leve (argila expandida)	18
2.1.4	Massa específica e resistência à compressão	20
2.1.5	Módulo de elasticidade	21
2.1.6	Zona de transição	23
2.1.7	Trabalhabilidade	25
2.2	Aditivos	26
2.2.1	Aditivo incorporador de ar	26
2.2.2	Aditivo expansor	29
2.3	Pilares mistos preenchidos	31
2.4	Aderência aço-concreto	33
2.4.1	Aderência por adesão	35
2.4.2	Aderência mecânica	36
2.4.3	Aderência por atrito	36
2.5	Confinamento	37
2.5.1	Forma da seção transversal do perfil tubular metálico	38
2.5.2	Resistência à compressão do concreto	39
2.5.3	Esbeltez local (D/t) e esbeltez global (L/D) do perfil tubular	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Agregado miúdo	41
3.2	Agregados graúdos	41
3.3	Cimento Portland	42
3.4	Aditivos	42
3.4.1	Aditivo incorporador de ar - LAS	42
3.4.2	Aditivo expansor	42
3.5	Aço	43
3.6	Ensaio Piloto	44
3.6.1	Argamassas	44
3.6.2	Dosagem do traço das argamassas	45
3.6.3	Protótipos piloto	46
3.7	Concreto	46
3.8	Protótipos mistos aço-concreto	47
3.9	Caracterização dos agregados	50
3.10	Análise por espectrometria de fluorescência de raios-x do aditivo expansor	50

3.11	Ensaio piloto.....	51
3.11.1	Resistência à compressão simples (NBR 5739:2007)	51
3.11.2	Análise da variação volumétrica dos protótipos piloto.....	51
3.12	Caracterização do concreto no estado endurecido.....	52
3.12.1	Absorção de água, índice de vazios e massa específica (NBR 9778:2005)..	52
3.12.2	Módulo de elasticidade estático (NBR 8522:2008)	53
3.12.3	Módulo de elasticidade dinâmico (NBR 8802:2013).....	54
3.13	Caracterização dos protótipos mistos aço-concreto	54
3.13.1	Investigação do efeito de expansão/contração do núcleo de concreto	54
3.13.2	Teste de cisalhamento.....	56
3.13.3	Microscopia óptica	57
3.13.4	Resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto.....	58
3.13.5	Resistência à compressão com carga aplicada à seção mista	59
4	RESULTADOS	61
4.1	Caracterização dos Agregados.....	61
4.1.1	Massa específica e massa unitária	61
4.1.2	Módulo de finura e dimensão máxima característica	62
4.1.3	Teor de material pulverulento – agregado miúdo.....	62
4.1.4	Absorção de água – agregado graúdo.....	63
4.2	Análise do aditivo expensor por espectrometria de fluorescência de raios - X.....	63
4.3	Ensaio piloto	64
4.3.1	Resistência à compressão das argamassas.....	64
4.3.2	Análise da variação volumétrica das argamassas	65
4.3.3	Definição das dosagens ótimas de aditivos.	66
4.3.4	Resistência à compressão dos concretos leves.....	68
4.3.5	Absorção de água e índice de vazios dos concretos leves	69
4.3.6	Massa específica dos concretos leves.....	71
4.3.7	Módulo de elasticidade dos concretos leves	72
4.4	Caracterização dos protótipos mistos aço-concreto.....	73
4.4.1	Investigação da expansão/contração do núcleo de concreto	73
4.4.2	Teste de cisalhamento.....	76
4.4.3	Microscopia óptica	79
4.4.4	Resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto.....	81
4.4.5	Resistência à compressão com carga aplicada à seção mista	84
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

O intenso processo de industrialização da construção civil, nos últimos anos, está associado à busca por sistemas estruturais e construtivos que visem o ganho de velocidade produtiva, eliminação de perdas e aumento da qualidade dos materiais empregados. A utilização de pilares mistos preenchidos tem revelado um grande potencial nesse novo cenário por proporcionar rapidez de execução, e vantagens técnicas, como elevada resistência, rigidez e ductilidade. Por esses motivos, essas estruturas têm sido amplamente estudadas por diversos pesquisadores ao longo dos anos, destacando-se: De Nardin (1999), Hu *et al.* (2003), Fujimoto *et al.* (2004), Oliveira (2008), Han *et al.* (2014), Liew *et al.* (2016), Ekmekyapar & Alleliw (2016), Rodrigues (2016).

Os pilares mistos preenchidos tornaram-se uma nova alternativa para a associação aço-concreto e uma forma de potencializar as vantagens desses dois materiais buscando a melhor solução estrutural.

O aço, resistente à tração, consegue transpor grandes vãos com baixo peso próprio e alta precisão dimensional. Garante rapidez de execução, melhor organização do canteiro de obras e resiste às ações da fase construtiva até que o concreto atinja resistência adequada, proporcionando uma diminuição de custos com formas e cimbramento. Atualmente, um dos materiais mais utilizados na construção civil são os perfis tubulares de aço, que proporcionam soluções mais leves, resistentes e de baixo peso próprio (Rodrigues, 2016).

O concreto, resistente à compressão, consegue se adaptar a qualquer tipo de forma, apresenta grande facilidade de execução e compõe seções mais rígidas que minimizam os problemas de flambagem do perfil de aço. Ao longo dos últimos anos, houve grande evolução da tecnologia do concreto devido ao avanço dos métodos de produção, modernização de equipamentos de pesquisa e uso de materiais alternativos aos tradicionais, como a argila expandida. Esse agregado de massa específica reduzida pode ser utilizado em substituição ao agregado convencional, dando origem ao concreto leve estrutural.

O concreto leve é utilizado na engenharia como solução para a redução do peso próprio das estruturas, visto que o material é de 20 a 30% mais leve que o

concreto convencional (Haque *et al.*, 2004). Investigações sobre a utilização desse tipo de concreto como preenchimento de colunas de aço indicam que o material, além de promover redução do peso das peças estruturais, proporciona ganhos com relação à interação aço-concreto e aumento da capacidade resistente do pilar misto (Assi *et al.*, 2003; Ghannam *et al.*, 2004; Mouli & Khelafi, 2007, Rodrigues, 2016).

A interação aço-concreto em um elemento misto é indispensável para que o mesmo desempenhe corretamente sua função, isto é, garanta a transferência de esforços e a compatibilização de deformações. Dessa forma, dois aspectos muito importantes na avaliação do comportamento de um sistema misto é a análise da aderência e do efeito de confinamento entre os materiais constituintes.

1.1 Justificativa

No projeto de sistemas mistos, o concreto e o aço devem trabalhar solidariamente para que a associação de seus comportamentos isolados satisfaça todas as exigências quanto à resistência, à rigidez e à estabilidade da seção (Araujo, 2009). O estudo sobre o trabalho conjunto dos perfis de aço preenchidos com concreto é alvo de várias pesquisas que buscam compreender e melhorar a interação entre os dois materiais de forma segura e eficiente.

O estudo teórico-experimental de Rodrigues (2016) avaliou a influência do tipo de concreto de preenchimento na aderência entre os materiais da seção mista. Os resultados encontrados demonstraram que o concreto leve foi a variação que apresentou a melhor aderência ao perfil fino de aço e uma maior reação ao efeito de confinamento.

Dessa forma, o presente trabalho, busca o melhor entendimento dos concretos com agregados leves nacionais, e propõe a utilização de um aditivo expansor, e de um agente incorporador de ar baseado em LAS proposto por Mendes *et al.* (2017), visando um melhor desempenho do concreto leve de preenchimento e uma maior compatibilização entre os materiais da seção mista.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é investigar os efeitos de confinamento e aderência em seções mistas compostas por perfis tubulares de parede fina preenchidos com três diferentes tipos de concreto: leve, leve com adição de incorporador de ar e leve com adição de expansor.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar propriedades mecânicas de interesse para os três diferentes tipos de concreto;
- Investigar a expansão/contração dos concretos de preenchimento durante o período de cura;
- Investigar a influência dos aditivos utilizados na interação aço-concreto;
- Avaliar o desempenho das seções mistas e suas interfaces.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentadas as principais definições e fundamentações teóricas acerca do concreto leve, dos aditivos incorporador de ar e expensor, dos pilares misto preenchidos, além de uma revisão sobre aderência e tensão de confinamento presentes nos componentes da seção mista.

2.1 Concreto leve

2.1.1 Definições

Define-se por concreto convencional, as misturas endurecidas compostas por agregados naturais (areia, cascalho, brita), ligante (fração quimicamente ativa) e água, com valores de massa específica aparente entre 2000 a 2800 kg/m³ (Aguiar, 2004).

Utiliza-se a designação concreto leve para identificar concretos com massa específica inferior à dos concretos convencionais, abaixo de 2000 kg/m³ (ABNT NBR 8953:2009), o que o torna um material de construção versátil, oferecendo vantagens técnicas, econômicas e ambientais (Haque *et al.*, 2004).

Segundo Rossignolo (2003), os concretos leves podem ser obtidos através de três métodos distintos:

- Utilização de agregado leve: substituição total ou parcial dos agregados convencionais (brita basáltica ou gnáissica) por agregados leves;
- Incorporação de ar: adição de substâncias incorporadoras de ar à pasta de concreto;
- Ausência de agregado miúdo, resultando em concretos sem finos.

Observa-se na Figura 2.1 as classificações do concreto leve. Neste trabalho, estudou-se apenas o concreto com agregado leve (argila expandida) para aplicação estrutural.

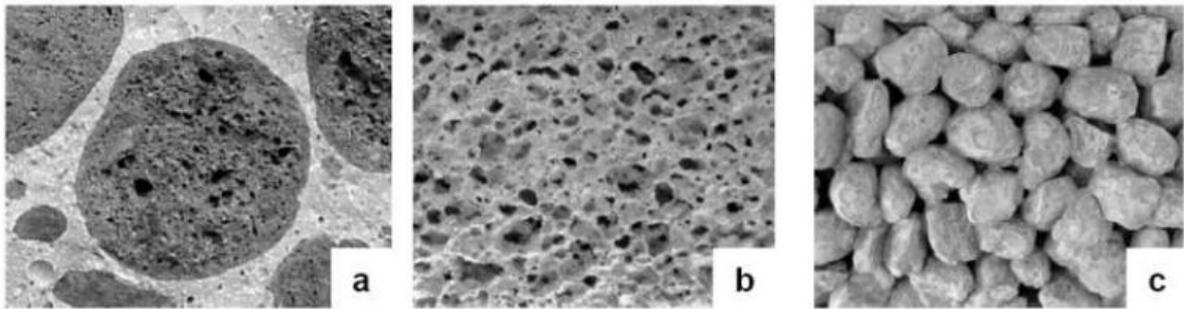


Figura 2.1 - Tipos de concreto leve: (a) com agregados leves, (b) com incorporação de ar, (c) sem finos.

Fonte: (Rossignolo & Agnesini, 2011).

2.1.2 Histórico

Os agregados de massa específica reduzida são utilizados há milênios na produção de concreto para a construção de elementos mais leves que os tradicionais. Suas primeiras aplicações datam de 1100 A.C. no México, com a utilização de uma mistura de pedra pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal (Isaia, 2011).

Os concretos com agregados leves foram utilizados pelos romanos na construção de grandes obras, destacando-se o Coliseu de Roma e a cobertura do Panteão, que se encontra atualmente em excelente estado de conservação após quase 2000 anos de sua construção (Angelin, 2014).

No início do século XX, o agregado leve começou a ser produzido industrialmente graças às pesquisas do engenheiro norte-americano Stephen J. Hayde sobre o processo de obtenção de agregados expandidos. Hayde observou, em uma pilha de refugo de tijolos cerâmicos que a matéria prima, quando submetida a altas temperaturas, expandia-se muito rapidamente, transformando-se em elementos deformados e leves (Bremner, 1998).

Através de pesquisas e do aperfeiçoamento do método de fabricação, os agregados leves tornaram-se materiais mais resistentes e com massa específica ótima. A empresa American Emergency Fleet Building Corporation, foi a primeira a utilizar esses novos agregados artificiais na construção de embarcações para a Primeira Guerra Mundial (Angelin, 2014).

No setor da construção civil, a partir da década de 60, houve uma popularização da execução de edifícios de múltiplos andares totalmente constituídos de concreto leve (Mouli *et al.*, 2004). No Brasil, os estudos e a utilização desse material tiveram início em 1970, com a implantação de uma unidade de produção de agregados leves (argila expandida), a atual CINEXPAN, localizada em São Paulo. A fábrica é a única que produz argila expandida para uso estrutural do país (Rossignolo, 2003).

2.1.3 Agregado leve (argila expandida)

Os agregados porosos naturais de origem vulcânica (pedra-pomes), por apresentarem resistência mecânica reduzida, não são materiais de interesse da engenharia. Por isso, na construção civil, são utilizados agregados porosos artificiais mais resistentes, produzidos a partir da argila ou ardósia, com granulometria adequada à composição de misturas de concreto leve (Leonhardt & Monnig 1979; Peixoto, 2004).

A argila expandida é obtida através de tratamento térmico de alguns tipos de argila em forno rotativo com temperatura, em média, de 1200° C. Nessa faixa de temperatura, parte do material se funde gerando uma massa viscosa, ao passo que a outra parte, por meio da decomposição química, libera gases que são incorporados pela parcela de material sinterizado, aumentando seu volume inicial em até sete vezes (Short & Kinniburgh, 1963; Coutinho, 1988; Santos, 1992).

O produto final desse processo de fabricação apresenta estrutura interna porosa coberta por uma camada vitrificada, formato arredondado e granulometria variada. Suas principais características são: leveza, isolamento térmico, baixa densidade, isolamento acústico, durabilidade e resistência a altas temperaturas (Rossignolo, 2009). O aspecto da argila expandida, a superfície externa e a estrutura interna desse agregado estão representados nas Figuras 2.2, 2.3 e 2.4, respectivamente.



Figura 2.2 - Aspecto da argila expandida.

Fonte: (Ke *et al.*, 2010)

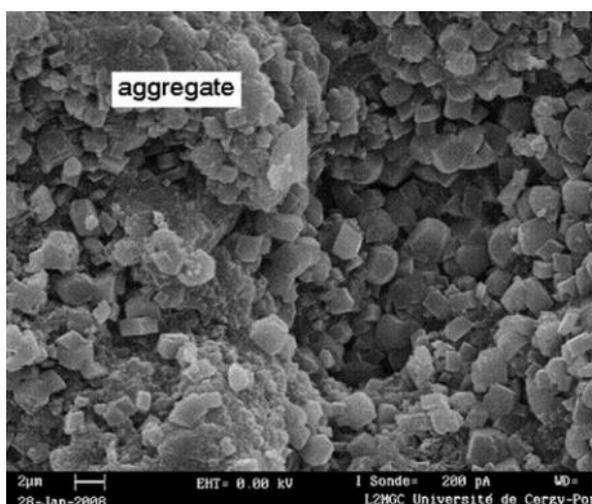


Figura 2.3 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da superfície externa de uma argila expandida.

Fonte: (Ke *et al.*, 2010).

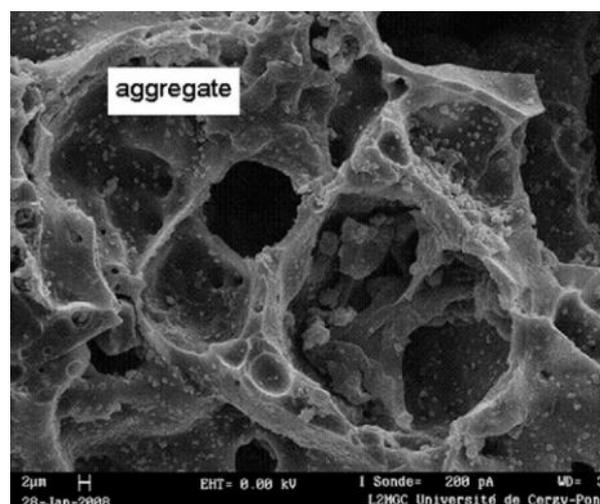


Figura 2.4 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da estrutura interna de uma argila expandida.

Fonte: (Ke *et al.*, 2010)

As características desse agregado leve, tais como, massa específica reduzida e porosidade, provocam mudanças significativas em algumas propriedades do concreto, tendo como exemplo a massa específica, resistência à compressão, módulo de elasticidade, zona de transição na interface e trabalhabilidade.

2.1.4 Massa específica e resistência à compressão

A massa específica e a resistência à compressão são propriedades bastante empregadas na especificação do concreto leve estrutural e estão diretamente relacionadas com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado (Rossignolo, 2003).

Uma das particularidades do concreto leve é possuir massa específica abaixo de 2000 kg/m^3 (ABNT NBR 8953:2009). Porém, o valor dessa propriedade não é um critério internacionalmente estabelecido, conforme se observa na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Critérios normativos para a classificação de concreto leve segundo valores de massa específica.

Norma (País, ano)	Massa específica γ (kg/m^3)
RILEM (Internacional, 1975)	$\gamma < 2000$
CEB - FIP (Internacional, 1977)	$\gamma < 2000$
BS EN 1991-1-1 (União Europeia, 2002)	$900 < \gamma < 2200$
ACI 213 (EUA, 2003)	$1400 < \gamma < 1850$
CSA A23.3 (Canadá, 2004)	$\gamma < 1850$

Há vantagens consideráveis com a redução da massa específica do concreto, como a diminuição significativa do peso próprio da estrutura, redução de gastos com materiais e obras de fundações, além de maior produtividade da construção (Mouli & Khelafi, 2007).

Devido à natureza da argila expandida, a resistência à compressão do concreto leve também é reduzida. Nos concretos convencionais, os componentes mecanicamente mais resistentes são os agregados, e por isso, a ruptura ocorre na zona interfacial de transição. No entanto, nos concretos leves, o agregado é o componente mais frágil, por onde a ruptura se inicia (Mouli *et al.*, 2004). Observa-se na Figura 2.5, a forma de ruptura dos concretos leve e convencional.

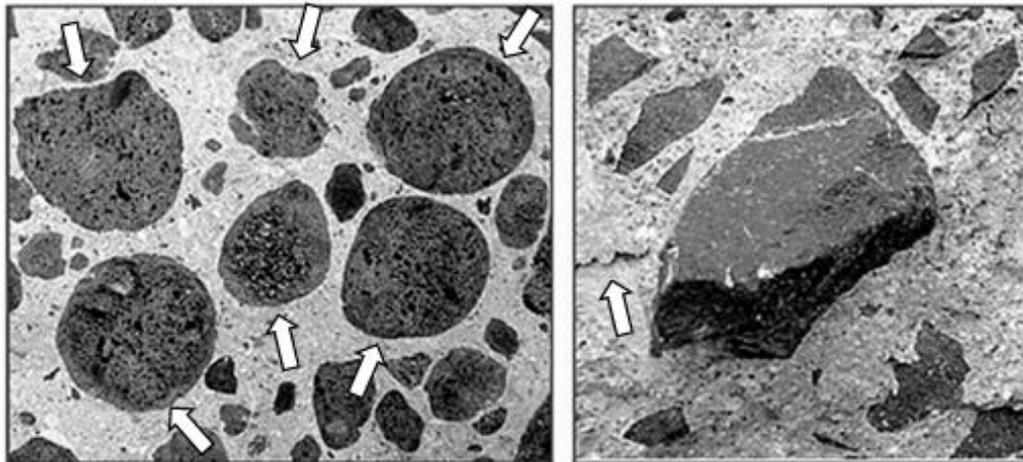


Figura 2.5 - Regiões de fraturas, indicadas por setas, dos concretos com agregados leves (à esquerda) e com agregados convencionais (à direita).

Fonte: (Adaptado de Rossignolo & Agnesini, 2005a).

Existe uma forte relação entre a massa específica e a resistência à compressão dos concretos leves. Alguns documentos normativos relacionam essas duas propriedades.

A ABNT NBR 35:1995 dispõe os valores mínimos de resistência à compressão dos concretos leves estruturais em função da massa específica aparente do material, apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores mínimos de resistência à compressão em função da massa específica para concreto leve estrutural.

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Massa específica aparente (kg/m ³)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: ABNT NBR 35:1995

O ACI 213R-03, *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, especifica, ainda, que o concreto leve estrutural deve apresentar resistência à compressão aos 28 dias acima de 17 MPa e massa específica seca na mesma idade variando entre 1120 kg/m³ e 1920 kg/m³.

2.1.5 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, é um parâmetro mecânico que possibilita a medida de rigidez do material e está associado com algumas de suas

propriedades intrínsecas, como: composição química, microestrutura e imperfeições (poros e trincas). No concreto, o módulo de elasticidade é considerado como a relação entre a tensão aplicada e a capacidade do material suportar as deformações. Portanto, quanto maior for o valor desse parâmetro, maior será a capacidade da peça de resistir às cargas sem deformações definitivas (Almeida, 2012).

O valor do módulo de elasticidade do concreto leve é consideravelmente menor que o valor obtido para um concreto de densidade convencional (Angelin, 2014). Segundo Mehta & Monteiro (2014), a porosidade do agregado leve provoca redução da rigidez desse material, limitando sua eficiência de restringir a deformação do concreto.

A capacidade de deformação do concreto leve é um aspecto positivo quando utilizado como preenchimento de perfis de aço. O estudo teórico-experimental de Rodrigues (2016) comparou o desempenho estrutural de colunas de aço preenchidas com três tipos de concreto: convencional, leve com argila expandida, e com ar incorporado, submetidas à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto. Os resultados obtidos demonstraram que o concreto leve apresentou melhor aderência ao perfil de aço, e uma maior reação ao confinamento, em relação aos demais protótipos. O menor módulo de elasticidade desse material, cerca de 47% inferior ao módulo encontrado para o concreto convencional (Figura 2.6), é responsável por sua maior deformação e expansão radial, a qual mobiliza as tensões de aderência e efeito de confinamento. Esse efeito, caracterizado pela restrição do tubo de aço à expansão do núcleo de concreto, proporciona aumento da capacidade resistente da seção mista.

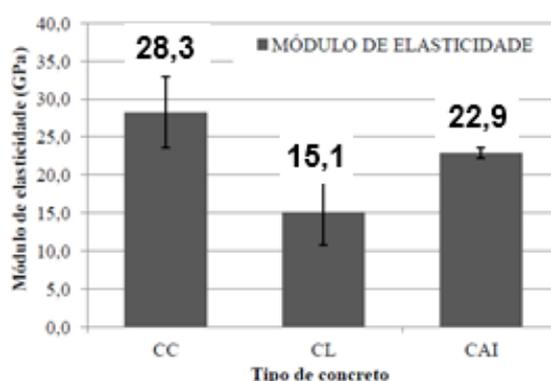


Figura 2.6 - Módulo de elasticidade do concreto convencional, leve e com ar incorporado.
Fonte: (Rodrigues, 2016)

Esse bom desempenho do concreto leve ao ser utilizado como preenchimento de perfis de aço vem sendo investigado por outros pesquisadores. Os testes de Assi *et al.* (2003) mostraram que os concretos com agregados leves melhoram significativamente a capacidade de carga de colunas tubulares de aço, pelo fato do efeito de confinamento ser bastante pronunciado. Os resultados da investigação experimental feita por Mouli & Khelafi (2007) demonstraram que as deformações radiais dos núcleos de concreto leve, quando submetidos à cargas axiais, acarretam em maior aderência, fortalecendo o vínculo na interface da seção mista. Além disso, os autores constataram que a força de ligação aço-concreto em colunas preenchidas com concreto convencional correspondeu a 50% da força obtida para os modelos preenchidos com concreto leve. Os resultados experimentais de Gao & Li (2011) demonstraram que as colunas de aço preenchidas com concreto leve apresentam excelente comportamento sísmico e desempenho mecânico, pelo fato de o material apresentar considerável aumento de ductilidade.

2.1.6 Zona de transição

O estudo da microestrutura da zona de transição agregado-matriz é de grande importância, pois essa região interfacial influencia, diretamente, as propriedades relacionadas à resistência mecânica, módulo de elasticidade, mecanismo de propagação de fissuras e durabilidade dos concretos (Monteiro, 1993).

A microestrutura da zona de transição é formada resumidamente da seguinte forma: inicialmente, no estado fresco do concreto, filmes de água envolvem os agregados graúdos devido o efeito parede, resultando em uma maior relação água/cimento na região próxima ao agregado, em comparação àquela existente na matriz de cimento; posteriormente, ocorre a hidratação do cimento originando etringita, hidróxido de cálcio e silicato de cálcio; a maior relação água/cimento próxima dos agregados graúdos, possibilita a produção de cristais maiores, o que torna a região mais porosa e com maior concentração de hidróxido de cálcio e etringita do que a verificada na matriz de cimento (Mehta & Monteiro, 2014).

O mecanismo de formação da zona de transição da interface (ZTI) é influenciado por muitos fatores, tais como relação água/cimento da mistura, porosidade, textura e tamanho dos grãos dos agregados (Xie *et al.*, 2015). Observa-

se na Figura 2.7 uma microscopia eletrônica de varredura (MEV) da ZTI de um concreto com xisto expandido.

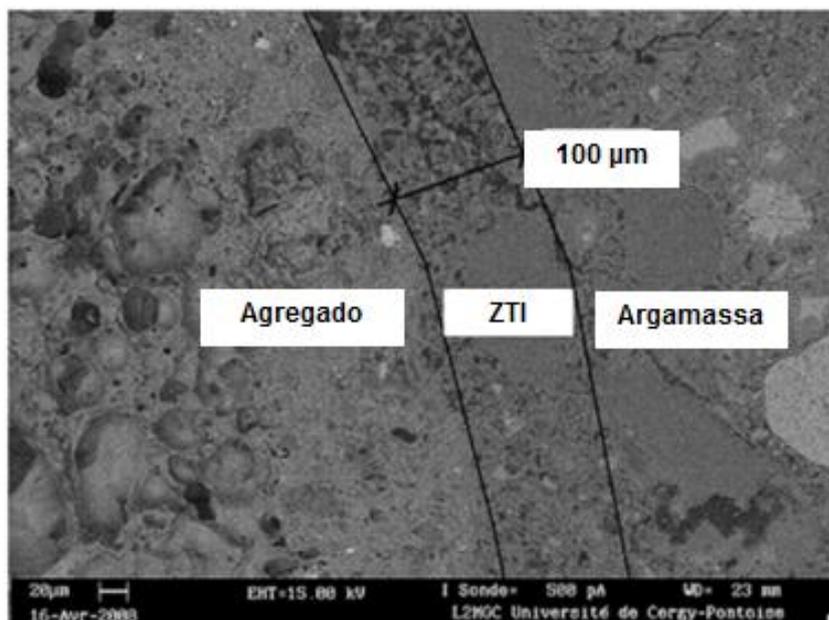


Figura 2.7 - MEV da zona de transição interfacial de um concreto com xisto expandido.

Fonte: (ke *et al.*, 2010)

Alguns estudos sobre a microestrutura de concretos com agregados leves demonstram que a interação entre esse tipo de agregado e a matriz cimentícia é bastante diferenciada da ocorrida nos concretos convencionais.

Segundo Zhang & GjØRv (1990), a ancoragem entre o agregado convencional e a pasta de cimento pode ser desprezível. Isso ocorre, pelo fato, desses tipos de agregados apresentarem superfícies externas polidas que diminuem resistência de ligação com o material cimentício. Além disso, a baixa porosidade e as irregularidades superficiais dos agregados convencionais contribuem para o acúmulo de água em torno do material, possibilitando a formação de cristais de hidratação maiores nessa região. Dessa forma, a zona de transição dos concretos convencionais por ser bastante espessa e porosa, é o elo mais fraco do sistema, por onde o processo de microfissuração inicia. Em contrapartida, os agregados leves, como a argila expandida, apresentam uma superfície externa áspera e porosa, por onde a pasta de cimento e os produtos de hidratação conseguem penetrar, formando ganchos de ligação entre o agregado e a matriz. À vista disso, os concretos leves apresentam zona de transição reduzida em razão da boa aderência entre os materiais da mistura, e com menor concentração de produtos de hidratação, pelo fato de o efeito parede

ser pouco pronunciado. As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), obtidas por Ke *et al.*, (2010) demonstram a ZTI de um concreto leve com argila expandida (Figura 2.8) e o detalhe da penetração da pasta de cimento através dos poros desse agregado (Figura 2.9).

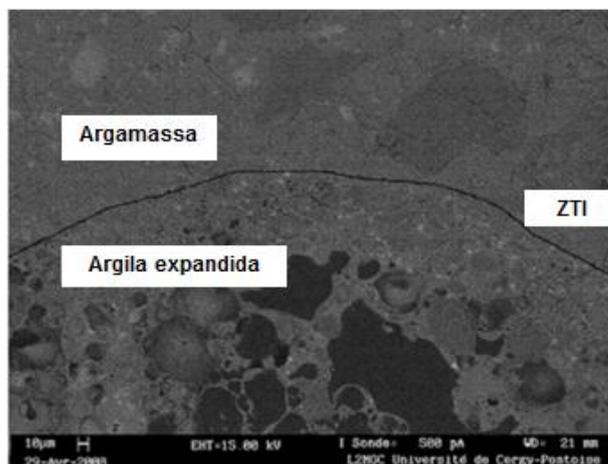


Figura 2.8 - ZTI de um concreto com argila expandida.

Fonte: (ke *et al.*, 2010)

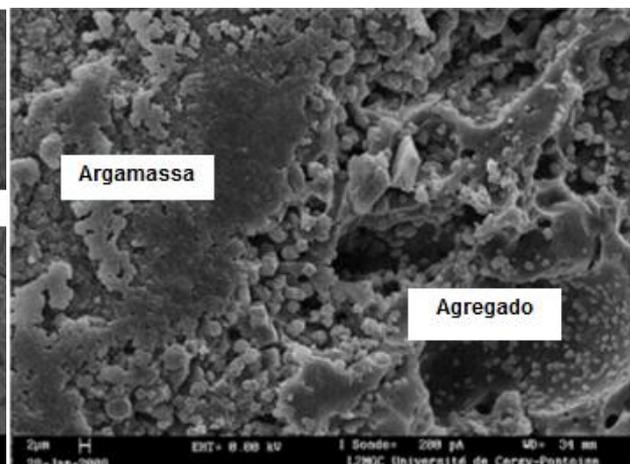


Figura 2.9 - Penetração da pasta de cimento através dos poros do agregado.

Fonte: (ke *et al.*, 2010)

2.1.7 Trabalhabilidade

Um dos parâmetros mais adequados para a verificação das características associadas à trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, é o índice de consistência, avaliado pelo abatimento do tronco de cone ou pela mesa de espalhamento (Mehta & Monteiro, 2014).

A faixa dos valores de abatimento dos concretos leves determinada pelo “slump test” é, normalmente, menor que a verificada nos concretos convencionais, devido essencialmente à baixa massa específica do agregado leve, que resulta em pequena deformação à ação da gravidade (Angelin, 2014).

O agregado leve, devido a sua estrutura interna porosa e massa específica reduzida, está sujeito à absorção de água e a segregação durante o manuseio do concreto, interferindo na trabalhabilidade (Rossignolo, 2009).

A alta quantidade de água absorvida por esse agregado pode ser desfavorável a algumas propriedades do concreto no estado endurecido, como o aumento da retração por secagem, aumento da massa específica e redução da resistência ao

fogo. Segundo a ABNT NBR 12821:2009, o alto índice de absorção de água pode ser minimizado saturando previamente as argilas expandidas por 24 horas, devendo ser usadas somente após o procedimento.

A segregação consiste na separação dos materiais constituintes do concreto devido às diferenças entre os valores das massas específicas e dimensões dos constituintes da mistura. As argilas expandidas, devido a sua baixa massa específica tendem a se assentar na parte superior da peça de concreto, fenômeno conhecido como flutuação (Catoia, 2012). Na produção de concretos leves, usualmente são empregados aditivos incorporadores de ar para controlar o efeito da segregação. Segundo Du & Folliard (2005), a força de flutuação das bolhas de ar incorporadas diminui a tendência de separação de partículas de agregado e cimento.

2.2 Aditivos

Aditivo é qualquer material (excetuando-se água, agregados, cimentos hidráulicos e fibras), adicionado à matriz cimentícia antes ou durante a mistura. A finalidade do aditivo é modificar algumas propriedades de concretos e argamassas de forma que melhor atendam às necessidades para os quais foram projetados. Comercialmente, existem mais de 20 tipos de aditivos, dentre eles os aditivos incorporadores de ar e os expansores (Mehta & Monteiro, 2014).

2.2.1 Aditivo incorporador de ar

O advento dos aditivos incorporadores de ar (AIA) e sua utilização em matrizes cimentícias representou um progresso tecnológico do setor de construção civil no último século. Esses aditivos introduzem no concreto microbolhas de ar (menores que 300 μm) estáveis, homoganeamente distribuídas que possibilitam (Du & Folliard, 2005):

- Melhorar a trabalhabilidade, reduzindo a tendência à exudação e segregação;
- Reduzir o peso próprio das estruturas, proporcionando diminuição das dimensões das fundações;
- Melhorar a coesão dos sistemas, facilitando o espalhamento manual;
- Utilizar formas que suportam menores tensões;

- Reduzir o módulo de elasticidade do concreto;
- Aumentar a resistência a ciclos de gelo-degelo;
- Reduzir o consumo de cimento nas composições.

O AIA, comumente aplicado em concretos leves e concretos submetidos à ciclos de gelo-degelo, é composto por substâncias tensoativas (surfactantes). Essas espécies químicas reduzem a tensão superficial das interfaces líquido-líquido, líquido-ar, sólido-líquido e sólido-ar melhorando a capacidade de molhamento, de incorporação de ar e de lavabilidade (Salager, 2002).

Segundo Torres *et al.* (2014), os surfactantes apresentam na mesma molécula uma porção hidrofílica (polar), constituída por hidrocarbonetos, e outra hidrofóbica (apolar), formada por grupamentos iônicos (aniônicos ou catiônicos), não- iônicos ou anfóteros, conforme ilustrado na Figura 2.10.

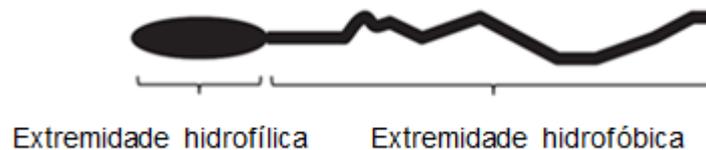


Figura 2.10 - Natureza química básica dos surfactantes.

Fonte: (Adaptado de Du & Folliard, 2005).

Os surfactantes são propensos a migrarem para interfaces, de modo que sua porção hidrofílica se encontre em contato com a fase líquida e sua porção hidrofóbica se encontre orientada para o ar ou partícula (Romano, 2005).

Segundo Mendes *et al.* (2017) apud Lea (1971) os AIA interagem na fase ar-água e na fase sólido-água da matriz cimentícia. Na fase ar-água, os grupos polares orientam-se na direção da fase aquosa, impedindo que as bolhas de ar incorporadas ao concreto no processo de mistura, se aglutinem, se rompam e emerjam à superfície. Na interface sólido-água, os grupos polares são atraídos pelo cimento tornando a superfície desse material hidrofóbica. Dessa forma, uma camada de ar é formada em volta dos grãos de cimento, o que proporciona aumento da distância entre as partículas sólidas, servindo como um lubrificante. O mecanismo de ação do AIA na matriz cimentícia está representado na Figura 2.11.

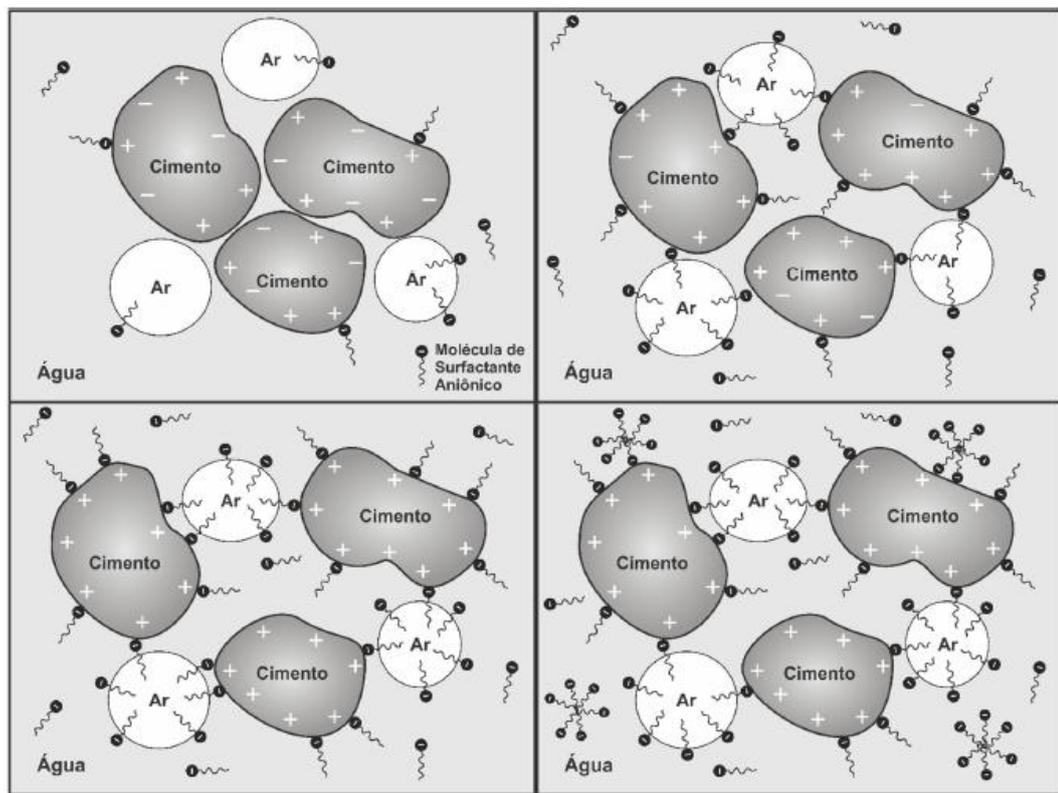


Figura 2.11 - Mecanismo de ação do AIA.

Fonte: (Mendes *et al.*, 2017).

Uma desvantagem da utilização desse tipo de aditivo é a redução da resistência mecânica com aumento do teor de ar incorporado (Mehta & Monteiro, 2014).

O aditivo incorporador de ar que será utilizado nesta pesquisa é o LAS – Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio, princípio ativo do detergente lava-louças com concentração de 5 a 25% de surfactante. Mendes *et al.* (2017) estudou a viabilidade desse produto, propondo o desenvolvimento de um novo aditivo de menor custo, atóxico e biodegradável. A partir dos resultados obtidos, foi possível constatar que as dosagens de 0,05% a 0,15% de LAS melhoram as características da matriz cimentícia sem redução significativa da resistência mecânica.

Dentro da dosagem recomendada, constatou-se que o AIA proposto:

- Produziu um sistema de espuma eficiente que garantiu a manutenção do teor de ar incorporado do estado fresco para o estado endurecido;
- Melhorou consideravelmente a trabalhabilidade e a coesão dos compostos no estado fresco, diminuindo a tendência à segregação;
- Reduziu a massa específica do concreto;

- Proporcionou uma maior taxa de incorporação de ar e um sistema de vazios mais estável do que o AIA comercial para dosagens próximas.

2.2.2 Aditivo expansor

A principal causa da deformação em materiais cimentícios, à exceção do carregamento, ocorre em razão da redução volumétrica através de um processo conhecido como retração (Melo Neto, 2008). Retração é um encolhimento da peça de concreto provocado por diversos fenômenos, dentre eles, a evaporação de água da mistura cimentícia logo após o fim de pega (retração por secagem) e o consumo de água devido à geração dos produtos de hidratação (retração autógena) (Carballosa *et al.*, 2015). Em seções mistas, esse fenômeno, além de reduzir a durabilidade do concreto de preenchimento, empobrece o vínculo na interface da seção, pois provoca a separação entre os dois materiais resultando em perda de aderência e de confinamento (Roeder *et al.*, 1999).

O uso de aditivos expansores, que agem gerando uma expansão de modo a compensar a retração, é uma boa alternativa para aumentar parâmetros de durabilidade e de compatibilização entre aço-concreto em seções mistas (Xu *et al.*, 2009). O efeito de retração e expansão de um concreto convencional e de um concreto expansivo está ilustrado na Figura 2.12.

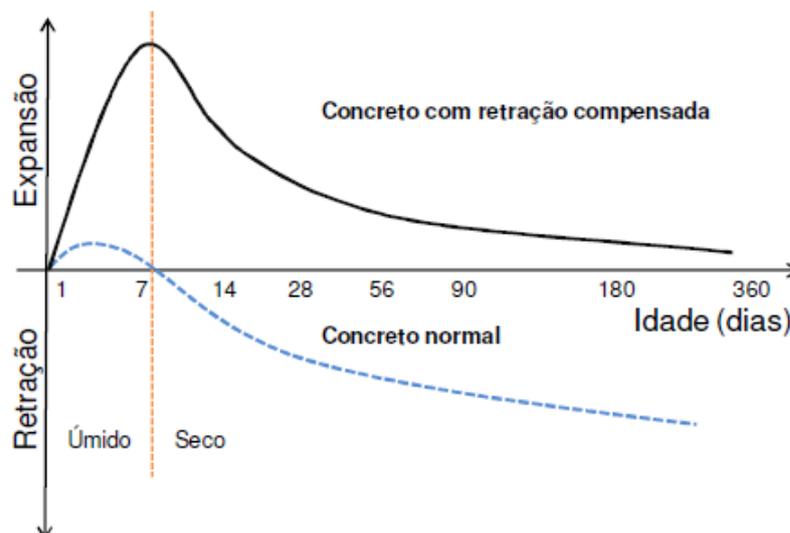


Figura 2.12 - Retração e expansão de um concreto convencional e de um concreto expansivo.

Fonte: (Melo Neto, 2008).

A etringita, quando formada após o endurecimento do concreto, provoca um mecanismo expansivo com consequente formação de um quadro fissuratório (Sachs, 2012). No caso de concretos expansivos, a formação desse produto de hidratação não é um efeito deletério, pois os aditivos expansores induzem a formação dessa estrutura entre 24 a 72 horas após a mistura da água com o cimento de forma uniforme em toda a peça de concreto (Konik *et al.*, 2007).

Os expansores a base de óxido de cálcio (CaO) induzem a formação da portlandita (CaOH₂) através de sua imediata hidratação quando em contato com a água (Carballosa *et al.*, 2015). A produção de cristais de portlandita implica em um aumento expressivo de volume da peça de concreto resultando em uma elevada expansão longitudinal (Carballosa *et al.*, 2015). Dessa forma, o uso desse aditivo exige rigoroso controle para que se atenda às necessidades para as quais foi projetado.

Carballosa *et al.* (2015) estudaram a influência dos dois tipos de aditivos expansores em concretos utilizados como preenchimento de tubos de aço e empregados como elementos estruturais. A partir dos resultados, os autores chegaram às seguintes conclusões:

- A cura é um aspecto fundamental para o desenvolvimento da expansão, pois existe necessidade de que se tenha água disponível para a formação de etringita e portlandita;
- A composição do cimento influencia fortemente a eficácia dos aditivos. Os sulfoaluminatos de cálcio são bastante eficientes em cimentos pozolânicos. Essa compatibilidade está relacionada com o maior conteúdo de alumina presente nesse tipo de cimento;
- Concretos aditivados com sulfoaluminatos após atingirem um pico de expansão experimentam certa retração, enquanto os aditivados com óxido de cálcio permanecem quase estáveis.
- Aditivos expansores promovem a incorporação de pequenas bolhas de ar à matriz cimentícia;
- Em seções mistas, o uso de aditivo expensor em concreto de preenchimento induz tensões na direção radial do tubo melhorando a pressão de confinamento, resultando em maior resistência da seção.

Kai-Cheng *et al.* (2011) investigaram o comportamento de contração/expansão e aderência aço-concreto em tubos de aço retangulares de parede fina preenchidos com concreto convencional e com concreto com agente expansor. Através dos resultados, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A proporção de aditivo expansor e a relação água-cimento tem influência importante na expansão do concreto;
- A tensão transversal aplicada ao tubo de aço, ocasionada pela expansão transversal do núcleo de concreto, aumenta antes da idade de 8 dias e quase permanece constante após a idade de 15 dias;
- O aumento da expansão do núcleo de concreto melhora significativamente a adesão entre os elementos da seção;
- Testes de *push-out* demonstraram que a aderência entre aço-concreto na interface dos tubos preenchidos com concreto expansor é de aproximadamente 1,36 vezes maior que na dos tubos preenchidos com concreto convencional.

Xu *et al.* (2009) estudaram um método de melhorar a capacidade de carga em pilares mistos preenchidos e a aderência na interface aço-concreto por meio de cimento expansivo do tipo sulfoaluminato. Os autores investigaram a expansão/contração do núcleo de concreto em protótipos mistos durante o endurecimento do material por meio de extensômetros posicionados na superfície externa dos perfis. Os resultados encontrados apontaram que durante o período de cura, o concreto expansivo induziu pré-tensões radiais na parede do tubo de aço, enquanto que o perfil metálico restringiu a expansão do núcleo, gerando o confinamento. Esse efeito proporcionou significativa melhora da aderência na interface, bem como no comportamento de deslizamento dos materiais avaliado em testes de *push-out*.

2.3 Pilares mistos preenchidos

Os pilares mistos preenchidos, sujeitos a força predominante de compressão, são elementos estruturais resultantes da utilização de um tubo de aço preenchido com concreto de qualidade estrutural (Oliveira, 2008). Nesses pilares, o concreto no interior do tubo minimiza os problemas de instabilidade (flambagem local e global) do perfil

de aço (De Nardin, 1999), e o perfil trabalha como um reforço transversal que restringe a expansão lateral do núcleo de concreto, o que proporciona aumento da resistência da seção devido ao efeito de confinamento (Yin *et al.*, 2006).

Em relação aos pilares de concreto armado, os pilares mistos preenchidos dispensam o uso de formas e escoramentos, já que o tubo de aço atua como uma seção resistente durante o lançamento e bombeamento do concreto, contribuindo para a velocidade de execução e redução de custos com mão de obra. Além disso, os pilares mistos preenchidos resistem a determinadas cargas apresentando área de seção transversal menor que os pilares de concreto armado, o que proporciona uma diminuição significativa do peso próprio da estrutura (Yin *et al.*, 2006, Giakoumelis & Lam, 2004). Outra importante propriedade desses tipos de pilares é a sua elevada ductilidade, possibilitando aumento da resistência sísmica (Han *et al.*, 2014). A principal desvantagem dessas estruturas é a menor resistência ao fogo, por apresentarem superfície de aço exposta (Yin *et al.*, 2006, Giakoumelis & Lam, 2004). Observa-se na Figura 2.13 as seções transversais mais utilizadas como pilares mistos preenchidos.

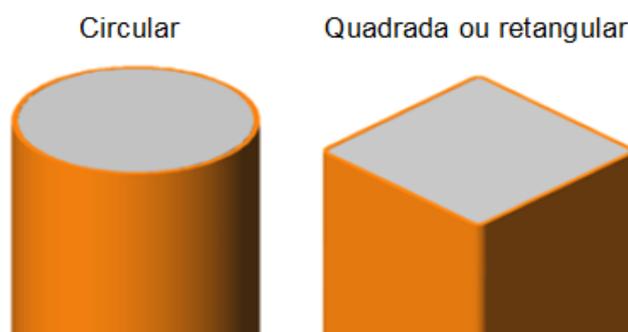


Figura 2.13 - Seções transversais mais utilizadas em pilares mistos preenchidos.

Fonte: (Oliveira, 2008).

Para que se garanta o bom funcionamento do pilar misto preenchido e os benefícios estruturais proporcionados por essa estrutura, é necessário que haja íntima interação entre os materiais aço-concreto de forma a garantir a transferência de esforços e a compatibilização de deformações. Portanto, dois aspectos muito importantes na avaliação do comportamento de um sistema misto são a aderência e o efeito de confinamento entre os materiais constituintes.

2.4 Aderência aço-concreto

A aderência é a propriedade responsável pela transferência de tensões de cisalhamento na interface aço-concreto e pela compatibilidade de deformações entre os materiais em uma estrutura mista. Não existindo aderência entre o aço e o concreto ocorre o deslizamento relativo entre os materiais e não se obtém o comportamento misto na seção (Silva, 2006).

Não existe um método padrão para o cálculo da tensão de cisalhamento transferida na interface de um pilar misto. No entanto, o cálculo geralmente se fundamenta em um valor médio expresso pela razão entre a componente da força normal no concreto ($N_{c,sd}$) e a área de transferência na interface, que corresponde ao produto do perímetro transversal (u_a) pelo comprimento (l_v), conforme ilustrado na Figura 2.14.

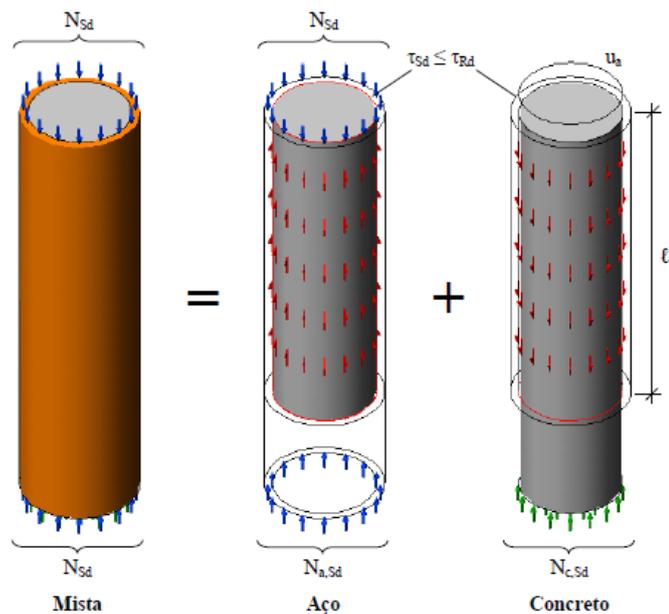


Figura 2.14 - Componentes das ações de cálculo e propriedades geométricas para o cálculo da tensão de cisalhamento na interface.

Fonte: (Johansson, 2003 apud Oliveira, 2008).

Dessa forma, a tensão de cisalhamento na interface é dada pela Equação 2.1:

$$\tau_{sd} = \frac{N_{c,sd}}{u_a l_v} \quad (2.1)$$

De acordo com Johansson (2003), nos pilares preenchidos a tensão de cisalhamento τ_{sd} deve ser menor que a tensão resistente de cálculo τ_{Rd} , estimada

em 0,4 MPa para seções tubulares retangulares e 0,55 MPa para seções tubulares circulares (ABNT NBR 8800:2008). Se, τ_{sd} for maior ou igual a τ_{Rd} a aderência natural não é suficiente para atingir a resistência ao cisalhamento necessária, devendo ser feito o uso de conectores de cisalhamento na interface aço-concreto.

A aderência natural pode ser dividida em três mecanismos distintos de transferência: adesão, aderência mecânica e atrito (Johansson, 2002). Araujo (2009) ilustra essas três parcelas por meio da curva tensão de cisalhamento *versus* escorregamento conforme a Figura 2.15.

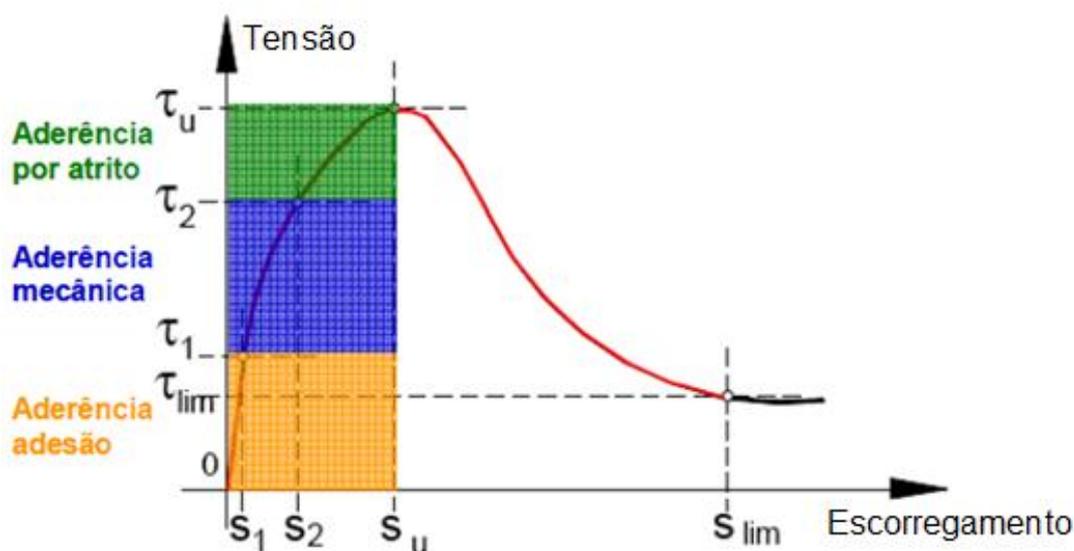


Figura 2.15 - Curva tensão de cisalhamento vs escorregamento.

Fonte: (Araujo, 2009).

Segundo Tao *et al.* (2016), a aderência natural pode variar de acordo com a geometria do perfil tubular. Nos perfis de seção circular, o atrito desenvolve-se em todo o perímetro da superfície interna, proporcionando maior tensão de aderência aço-concreto. Já nos perfis retangulares, a tensão intensifica-se somente próximo aos cantos da seção. Além disso, outros fatores relevantes que influenciam a intensidade da aderência entre o aço e o concreto em seções mistas são o grau de rugosidade da superfície interna do tubo (Virdi & Dowling, 1980), retração do núcleo de preenchimento (Roeder *et al.*, 1999) e o efeito de confinamento (Johansson & Gylltoft, 2002).

2.4.1 Aderência por adesão

A adesão, também denominada de aderência química, manifesta-se durante as reações de pega do cimento, etapa em que surgem as ligações físico-químicas na interface aço-concreto (Araujo, 2009).

Essa parcela de aderência está associada ao primeiro intervalo da curva tensão vs escorregamento, surgindo nos estágios iniciais do carregamento, quando os deslocamentos ainda são pequenos e as tensões atingem valores máximos equivalentes a 0,1 MPa. Dessa forma, a adesão é considerada um mecanismo elasto-plástico relacionada à rugosidade da interface aço-concreto (Silva, 2006). Observa-se o mecanismo de transferência da aderência por adesão na Figura 2.16.

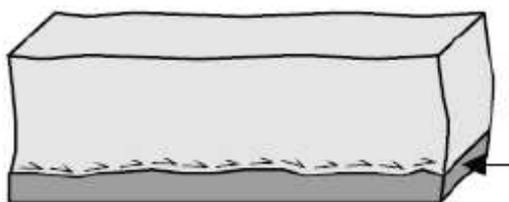


Figura 2.16 - Mecanismo de transferência da aderência por adesão.

Fonte: (Johansson, 2002).

Segundo os estudos de Roeder *et al.* (1999), a expansão radial do núcleo de concreto ocasionada pela pressão de bombeamento desse material no estado fresco, contribui para a melhora da adesão. Por outro lado, a retração do núcleo, que provoca a separação aço-concreto, é o fator que diminui significativamente a intensidade dessa parcela de aderência.

De acordo com Queiroz *et al.* (2001), os valores de carga correspondentes à ruptura da adesão química são bastante variáveis, dependendo de fatores como: relação água-cimento, desenvolvimento de fissuras, retração do concreto, tensões devidas à variação de temperatura e falhas locais de contato entre os materiais da seção mista.

2.4.2 Aderência mecânica

Segundo Viridi & Dowling (1980) *apud* Silva (2006), a aderência mecânica é definida pelo termo *micro-engrenamento*, referindo-se ao engrenamento mecânico entre o concreto do núcleo e as irregularidades superficiais internas do tubo de aço.

De acordo com Silva (2006) 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 o aço e o concreto. Observa-se na Figura 2.17. o mecanismo de transferência da aderência mecânica.

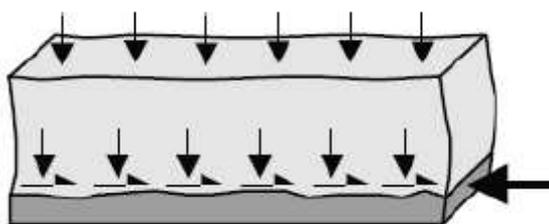


Figura 2.17 - Mecanismo de transferência da aderência mecânica.

Fonte: (Johansson, 2002).

Segundo Araujo (2009), o adensamento do concreto tem importante influência na parcela da aderência mecânica. Dessa forma, devem-se executar bons adensamentos de forma a possibilitar um maior engrenamento mecânico entre o aço e o concreto.

2.4.3 Aderência por atrito

A aderência por atrito está relacionada com a força normal aplicada na interface e seu coeficiente de atrito, o qual considera o grau de rugosidade e a condição da superfície. Esse coeficiente pode variar de zero, para superfície interna coberta por óleo lubrificante, a 0,6, em circunstâncias normais de utilização (Silva, 2006). Observa-se o mecanismo de transferência da aderência por atrito na Figura 2.18.

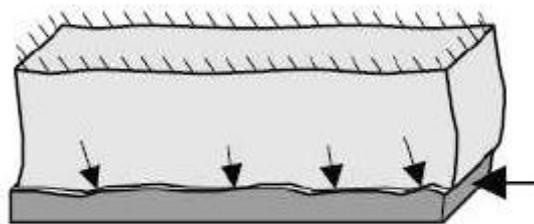


Figura 2.18 - Mecanismo de transferência da aderência por atrito.

Fonte: (Johansson, 2002).

2.5 Confinamento

Um dos fatores mais relevantes no estudo de pilares mistos preenchidos é o efeito de confinamento, caracterizado pela restrição do tubo de aço à expansão do núcleo de concreto (Oliveira *et al.*, 2009).

Johansson & Åkesson (2002) relatam o efeito de confinamento em um pilar misto preenchido em três etapas: nos estágios iniciais de carregamento, o perfil tubular não exerce confinamento sobre o núcleo, pelo fato do coeficiente de Poisson do concreto ser menor que o do aço. No entanto, quando a carga aplicada na estrutura atinge o valor próximo a resistência uniaxial do concreto, ocorre um intenso processo de microfissuração e expansão desse material a ponto de solicitar o tubo de aço, gerando o confinamento. Nessa fase, o concreto fica submetido a um estado triaxial de tensões, causado pela combinação da pressão lateral e compressão axial, e o perfil tubular a um estado biaxial. Dessa forma, o valor da capacidade resistente da estrutura mista, torna-se superior à soma dos valores das parcelas de resistência do tubo de aço e do núcleo de concreto. Observa-se na Figura 2.19 uma representação das tensões de confinamento atuantes nos materiais da seção.

Além do aumento da capacidade resistente da seção, o confinamento oferecido pelo tubo metálico melhora a ductilidade do concreto, que em condições normais, apresentaria comportamento frágil e ruptura brusca (Liew *et al.*, 2016). A elevada ductilidade e a grande capacidade de absorção de energia proporciona um ótimo desempenho dos pilares mistos preenchidos em situações de sismos (Hu *et al.*, 2003).

O grau de acréscimo na capacidade resistente e na ductilidade da seção mista, ocasionado pelo efeito de confinamento, depende de uma série de fatores, dos quais

se destacam: forma da seção transversal do perfil tubular, resistência à compressão do concreto e índice de esbeltez local (D/t) e global (L/D) do perfil tubular.

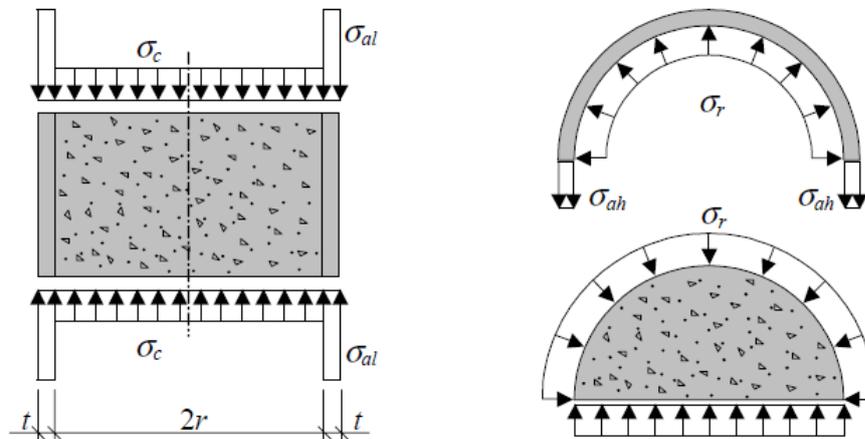


Figura 2.19 - Tensões no núcleo de concreto e no tubo metálico: σ_c – tensão de compressão longitudinal no concreto; σ_{al} – tensão de compressão longitudinal no aço; σ_r – tensão no núcleo de concreto; σ_{ah} – tensão no perfil de aço.

Fonte: (Johansson & Åkesson, 2002).

2.5.1 Forma da seção transversal do perfil tubular metálico

De acordo com Shanmugam & Lakshmi (2001) a forma da seção transversal do perfil tubular metálico tem grande influência no efeito de confinamento. Em seções circulares, todo o concreto de preenchimento está sujeito a um mesmo grau de confinamento, conforme se observa na Figura 2.20a. Já nas seções quadradas e retangulares, o efeito de confinamento é pronunciado somente nos cantos da seção, pois os lados não apresentam suficiente rigidez para suportar à pressão exercida pelo concreto em expansão (Figura 2.20b).

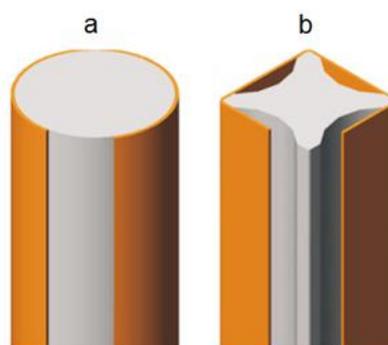


Figura 2.20 - Influência da forma da seção transversal no confinamento de pilares preenchidos

Fonte: (Adaptado de Oliveira, 2008)

2.5.2 Resistência à compressão do concreto

De Nardim & El Debs (2007) analisaram o comportamento de colunas de aço preenchidas com concreto de alta resistência quando submetidas a carregamento concêntrico. De acordo com os resultados experimentais, pode-se concluir que a ductilidade do concreto de alta resistência aumenta quando confinado por um perfil de aço, ao passo que a capacidade de carga não é alterada, pelo fato do efeito de confinamento ser pouco pronunciado. Segundo os autores, a redução desse efeito com o aumento da resistência do núcleo de preenchimento, está relacionada com a grande capacidade dos concretos de alta resistência suportarem às cargas com pequena deformação axial.

Ekmekyapar & Alleliw (2016) analisaram o efeito de confinamento em colunas mistas circulares preenchidas com concretos de 56, 66 e 107 MPa de resistência, de acordo com o índice de força (SI). Esse índice, calculado pela Equação 2.2, é uma medida bastante útil para avaliação do efeito de confinamento em pilares mistos preenchidos submetidos a cargas axiais.

$$SI = \frac{N_u}{A_s f_y + 0,85 A_c f_{ck}} \quad (2.2)$$

Na expressão, N_u indica a resistência à compressão da seção transversal da coluna mista, determinada por ensaios experimentais ou especificações do modelo, A_s a área da seção transversal do aço, f_y a tensão de escoamento do aço, A_c a área da seção transversal do concreto e f_{ck} a resistência à compressão desse material.

Após a realização dos ensaios, os autores constataram que o índice de força das colunas mistas decaiu com o aumento da resistência à compressão dos núcleos de concreto. Dessa forma, o efeito de confinamento é bastante pronunciado para concretos menos resistentes, os quais apresentam elevada capacidade de microfissuração e deformação radial.

2.5.3 Esbeltez local (D/t) e esbeltez global (L/D) do perfil tubular

Simões (2008) avaliou experimentalmente protótipos com diferentes relações D/t (relação entre o diâmetro e a espessura do tubo). Os resultados revelaram que o aumento do valor da esbeltez local reduz o efeito de confinamento, pelo fato de o perfil

tubular estar mais propenso à flambagem local. Esse fenômeno de instabilidade reduz a capacidade resistente do tubo diminuindo sua eficiência de restringir a expansão do núcleo de concreto.

Os resultados experimentais de Zeghiche & Chaoui (2005) demonstraram que o efeito de confinamento sobre o núcleo de concreto de preenchimento decai com o aumento da esbeltez global (relação entre o comprimento e o diâmetro do perfil de aço). Segundo Oliveira *et al.* (2009), em pilares muito esbeltos, os fenômenos de instabilidade global ocorrem antes de serem manifestadas deformações suficientes para mobilizar o efeito de confinamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos empregados no preparo dos concretos leves de preenchimento, dos tubos de aço e dos protótipos mistos aço-concreto (tubos de aço preenchidos com os concretos propostos).

Este capítulo também descreve os materiais e métodos aplicados no desenvolvimento dos ensaios piloto em argamassas, realizados anteriormente à confecção dos protótipos principais. Esses ensaios iniciais foram executados a fim de melhor compreender a atuação dos aditivos propostos nas matrizes cimentícias e avaliar algumas propriedades das matrizes modificadas por essas adições.

3.1 Agregado miúdo

Para a produção das matrizes de cimento Portland, foi utilizado como agregado miúdo a areia natural do Rio do Peixe, extraída da cidade de Ponte Nova (MG).

3.2 Agregados graúdos

Para a produção dos concretos leves utilizou-se como agregado graúdo a argila expandida nacional, fabricada pela empresa CINEXPAN S.A., em duas graduações: 6-15 mm (CINEXPAN 1506) e 15-22 mm (CINEXPAN 2215). A Figura 3.1 ilustra as duas graduações desses agregados leves.



Figura 3.1 - Agregados leves nacionais: (a) CINEXPAN 1506 e, (b) CINEXPAN 2215.

3.3 Cimento Portland

Na produção dos concretos e argamassas piloto, utilizou-se o cimento pozolânico CPIV-32RS fabricado pela empresa Liz, produzido de acordo com a NBR 5736:1991. Optou-se por usá-lo, pois de acordo com a literatura, os aditivos expansores tem melhor desempenho nesse tipo de cimento. Observa-se na Tabela 3.1 as características e propriedades do material.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas e químicas do CPIV-32RS.

Propriedades CPIV-32RS	Valor
Massa específica (g/cm ³)	2,97
Início de pega (min)	235
Fim de pega (min)	285
Resistência à Compressão 1 dia (MPa)	5,1
Resistência à Compressão 3 dias (MPa)	12,3
Resistência à Compressão 7 dias (MPa)	20,1
Resistência à Compressão 28 dias (MPa)	32,6

* Valores disponibilizados pela fabricante Liz.

3.4 Aditivos

3.4.1 Aditivo incorporador de ar - LAS

O aditivo incorporador de ar empregado foi o detergente neutro, estudado e proposto por Mendes *et al.* (2017). Conforme a Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos, o produto é composto por uma associação de tensoativos aniônicos entre 6 e 10%, compreendendo LAS (CAS: 25155-30-0); Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Trietanolamina (CAS: 27323-41-7) e Lauril Éter Sulfato de Sódio (CAS:9004-82-4) (Química Amparo LTDA, 2011).

3.4.2 Aditivo expansor

O aditivo expansor utilizado foi o MC-Quellmittel fabricado pela empresa MC-Bauchemie. Observa-se na Tabela 3.2 alguns dados técnicos e características do produto.

Tabela 3.2 - Dados técnicos e características do aditivo expansor MC-Quellmittel.

Características e propriedades	Unidade	Valor
Densidade	g/cm ³	1,40
Dosagem	%	0,1 a 1,0 sob a massa de cimento
Aspecto	-	Sólido
Estado	-	Pó
Cor	-	Cinza

*Ficha técnica disponibilizada pela empresa MC- Bauchemie.

3.5 Aço

Os perfis de aço utilizados foram tubos circulares formados a frio com diâmetro externo de 100 mm e espessura de 2 mm (Figura 3.2a), produzidos com aço de baixa liga SAE 1020, com tensão de escoamento (f_y) e tensão última (f_u) estimadas em 210 MPa e 380 MPa, respectivamente (SAE, 1992; SAE 2012).

Os tubos utilizados na composição dos protótipos mistos preenchidos para a investigação da expansão/contração do núcleo de concreto foram cortados em peças com comprimento de 200 mm (Figura 3.2b). Essa medida foi utilizada a fim de viabilizar a colagem dos extensômetros nas faces internas dos tubos para a realização do ensaio.

Os tubos usados na constituição dos protótipos mistos ensaiados à resistência à compressão e ao cisalhamento foram cortados em peças com comprimento de 550 mm (Figura 3.2c). Essa dimensão foi adotada com o propósito de criar tubos suficientemente longos onde seria possível a identificação do escorregamento relativo do núcleo de concreto.

Os procedimentos de corte foram realizados no Laboratório de Estruturas DECIV/EM/UFOP, utilizando uma serra de fita Starrett S3720®.

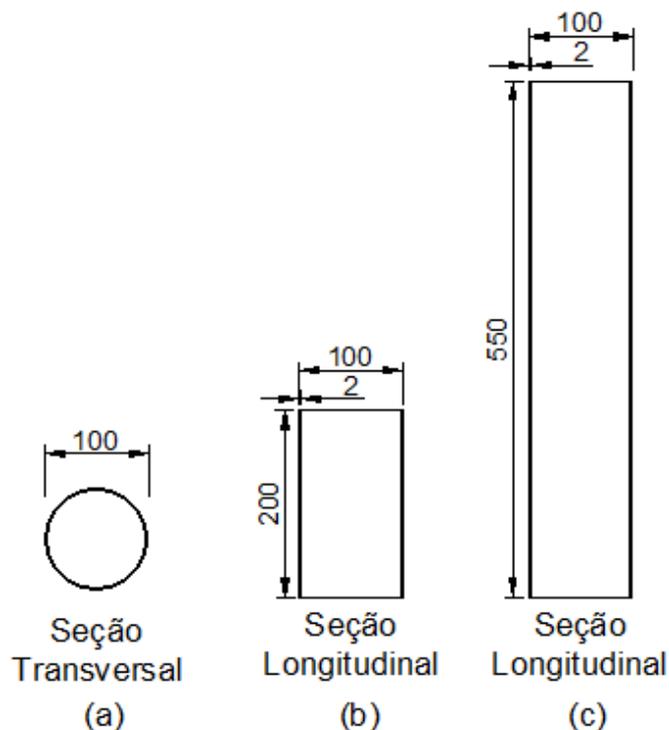


Figura 3.2 - Dimensões dos tubos de aço: a) seção transversal; b) seção longitudinal dos tubos utilizados para a investigação da expansão/contração do núcleo de concreto; c) seção longitudinal dos tubos usados em ensaios de resistência à compressão e testes de cisalhamento.

3.6 Ensaios Piloto

3.6.1 Argamassas

Anteriormente à confecção dos protótipos principais, foram executados ensaios em argamassas a fim de melhor compreender a atuação dos aditivos propostos nas matrizes cimentícias e determinar a melhor dosagem para os concretos leves. As argamassas foram executadas utilizando-se o traço padrão para a determinação da resistência à compressão de cimentos Portland (NBR 7215:1996). O fator água/cimento de 0,48 preconizado pela NBR 7215 foi ajustado conforme o Índice de Consistência (NBR 13276:2005) que estabelece abertura ideal de espalhamento igual a 260 ± 5 mm. Observa-se na Figura 3.3 o espalhamento da argamassa com o fator água/cimento de 0,48 e o espalhamento com o fator corrigido de 0,74.

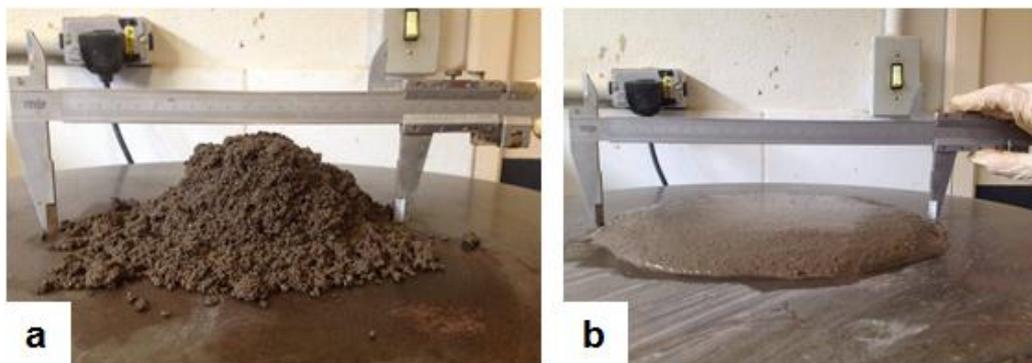


Figura 3.3 - (a) Argamassa com fator água/cimento de 0,48 e (b) argamassa com fator água/cimento de 0,74.

Após a correção, o traço 1:3:0,74 (cimento: agregado miúdo: relação água/cimento) foi estabelecido para os diferentes tipos de dosagem com e sem aditivo. Os materiais e as especificações de suas quantidades para a elaboração dessas argamassas encontram-se listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Materiais utilizados por batelada das argamassas.

Material	Massa (g)
Cimento Portland CP IV-32 RS	624
Água	460
Areia	1872

3.6.2 Dosagem do traço das argamassas

Observa-se na Tabela 3.4 a identificação das argamassas e a dosagem dos aditivos das misturas. O aditivo LAS foi usado após dissolução na água de amassamento, e o aditivo expansor foi adicionado ao final do processo de mistura conforme prescrição do fabricante.

Tabela 3.4 - Dosagem do traço das argamassas.

Argamassa	Aditivo	Dosagem Aditivo (%)*
SD	Padrão (sem aditivo)	-
L1	LAS	0,05
L2	LAS	0,1
L3	LAS	0,15
EX1	Expansor	0,1
EX2	Expansor	0,5
EX3	Expansor	1,0

* Porcentagem em relação à massa de cimento.

Para cada argamassa projetada foram produzidos 4 corpos-de-prova cilíndricos de 5 x 10 cm (diâmetro x altura) para testes de resistência à compressão (NBR 5739:2007), e 3 protótipos piloto para análise da variação volumétrica.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram produzidos usando moldes metálicos e colocados em câmara úmida para cura inicial de 24 horas. Posteriormente, foram desmoldados e mantidos em câmara úmida por mais 27 dias.

3.6.3 Protótipos piloto

Os protótipos piloto foram desenvolvidos para a análise da variação volumétrica das argamassas executadas. Para a elaboração desses modelos, foram utilizadas membranas látex preenchidas com aproximadamente 100 ml das argamassas especificadas. As membranas foram usadas como material de revestimento por permitirem a expansão/retração da matriz cimentícia com mínima restrição. Observe-se na Figura 3.4 o processo de preparação dos protótipos. Durante o procedimento, utilizou-se procedimentos para impedir a retenção de ar junto à argamassa.

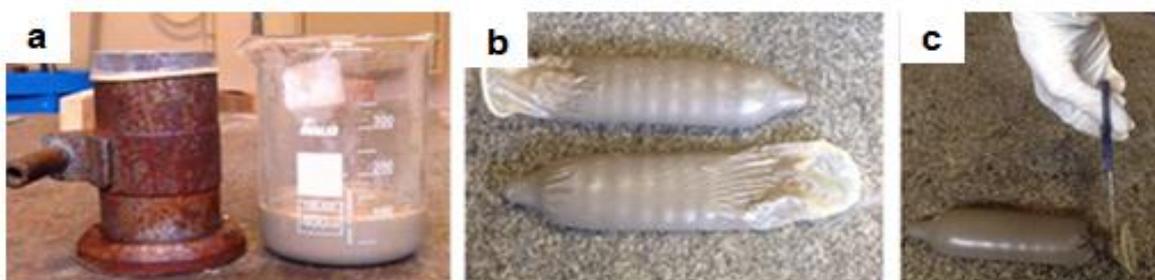


Figura 3.4 - Produção dos protótipos para a análise da variação volumétrica: a) moldagem; b) aspecto da membrana antes de ser fechada por um nó; c) remoção do excesso de material da membrana.

Após a execução, os modelos foram levados à câmara úmida, juntamente com os corpos-de-prova cilíndricos, para a cura. Foram retirados da câmara no momento das pesagens hidrostáticas para a avaliação do volume.

3.7 Concreto

As misturas de concreto leve foram projetadas de acordo com o método IPT/EPUSP (Torres & Rosman, 1956), por meio de *software* computacional especialista para dosagens de misturas cimentícias desenvolvido por Soares (2009).

A classe de resistência considerada no dimensionamento das misturas foi a C₁₅ (15 MPa) aos 28 dias. A consistência foi determinada pelo abatimento de tronco de cone (NBR NM 67:1998) fixado em 60 ± 10 mm. As correções necessárias foram feitas para corresponder às condições especificadas.

Para cada projeto de mistura, foram produzidos três concretos diferentes: um concreto sem aditivos (CSA), utilizado como referência, um concreto expansivo (CEX), produzido com aditivo expansor, e um concreto com ar incorporado (CLAS), produzido com adição de LAS. Foi utilizado o teor ótimo de aditivos obtido pelos ensaios piloto em argamassas. Observa-se na Tabela 3.5 os traços ajustados (Cimento: Agregado Miúdo: Agregado Graúdo 1 - argila 1506: Agregado Graúdo 2 - argila 2215) de cada tipo de concreto.

Tabela 3.5 - Traços dos concretos executados.

Concreto	Traço	Aditivos		Fator A/C
		Expansor	LAS	
CSA	1: 1,35: 0,49: 0,52	-	-	0,55
CEX	1: 1,35: 0,49: 0,52	1,0%	-	0,55
CLAS	1: 1,35: 0,49: 0,52	-	0,10%	0,53

As misturas de cada tipo de concreto foram executadas utilizando-se misturador horizontal CSM MF 270LM® em quantidade suficiente para produção de 9 corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20 cm (diâmetro x altura) para os testes de caracterização do concreto no estado endurecido, e para o preenchimento dos tubos de aço na produção dos protótipos mistos.

Os corpos-de-prova de concreto foram produzidos em formas metálicas e moldados em 2 camadas adensadas com 12 golpes conforme a NBR 5738:2008. Todos os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas e curados cobertos por uma manta umedecida.

3.8 Protótipos mistos aço-concreto

Os protótipos mistos foram executados para a investigação do efeito de expansão/contração do núcleo de concreto, testes de cisalhamento e ensaios de resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto e à seção mista.

Para a investigação do efeito de expansão/contração do núcleo de concreto durante o período de cura, foram coladas duas rosetas de deformação a 45°, uma na face interna e outra na face externa dos tubos, à meia altura. Observa-se na Figura 3.5, o posicionamento e os detalhes de instalação dos sensores elétricos.

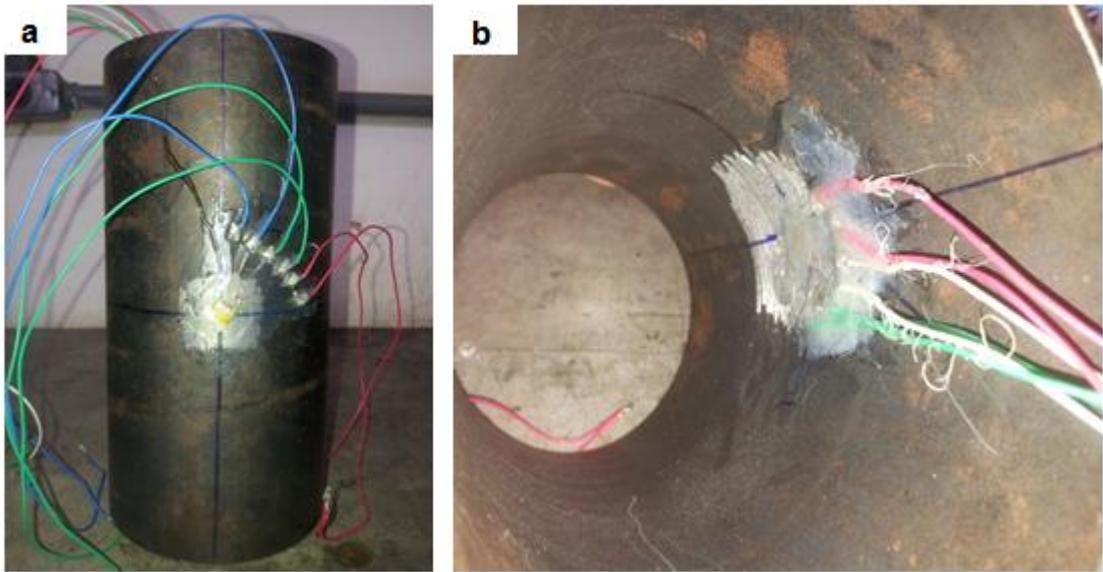


Figura 3.5 - Posicionamento dos extensômetros nos tubos: a) Face externa; b) Face interna.

Após a colagem dos extensômetros, uma perfuração foi feita nas paredes dos tubos para a passagem dos fios internos. Além disso, uma chapa metálica foi soldada na extremidade inferior dos perfis e outra foi conectada ao sistema por meio de barras rosqueadas após a concretagem (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Sistema para a investigação do efeito de expansão/contração do núcleo de concreto.

Posteriormente à instrumentação e conexão dos extensômetros ao sistema de aquisição de dados, os tubos foram preenchidos com os concretos (CSA, CEX e CLAS) em 5 camadas adensadas com 12 golpes, conforme a NBR 5738:2008. Foi confeccionado 1 protótipo misto experimental, representado na Figura 3.6, para cada variação do tipo de concreto.

Para a execução dos protótipos mistos para os testes de cisalhamento, inicialmente foi afixada à base do tubo um disco de madeirite usinada de 20 mm de espessura e diâmetro equivalente ao diâmetro interno do perfil. A base foi afixada com o intuito de, após o endurecimento do núcleo de concreto, obter-se uma região sem preenchimento (Figura 3.7) para possibilitar o deslocamento do material no momento de aplicação da carga de compressão. Posteriormente, os tubos foram preenchidos com os concretos (CSA, CEX e CLAS) em 5 camadas adensadas com 12 golpes, conforme procedimentos descritos na NBR 5738:2008. Foi executado 1 protótipo misto para cada variação do tipo de concreto, os quais foram curados durante o período de 28 dias cobertos por uma manta umedecida.



Figura 3.7 - Detalhe da região sem preenchimento na extremidade inferior do protótipo misto.

Para os ensaios de resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto e à seção mista, os tubos de aço foram totalmente preenchidos com as três variações de concreto leve e compactados em 5 camadas com aplicação de 12 golpes (NBR 5738:2008). Foram coladas nas faces externas dos tubos, a meia altura do perfil, rosetas de deformação a 45° para investigação do efeito de confinamento e aderência. Para cada ensaio de resistência à compressão foi executado 1 protótipo misto de cada variação do tipo de concreto, os quais foram curados durante o período de 28 dias

cobertos por uma manta umedecida. Observa-se na Figura 3.8, os detalhes da instrumentação.

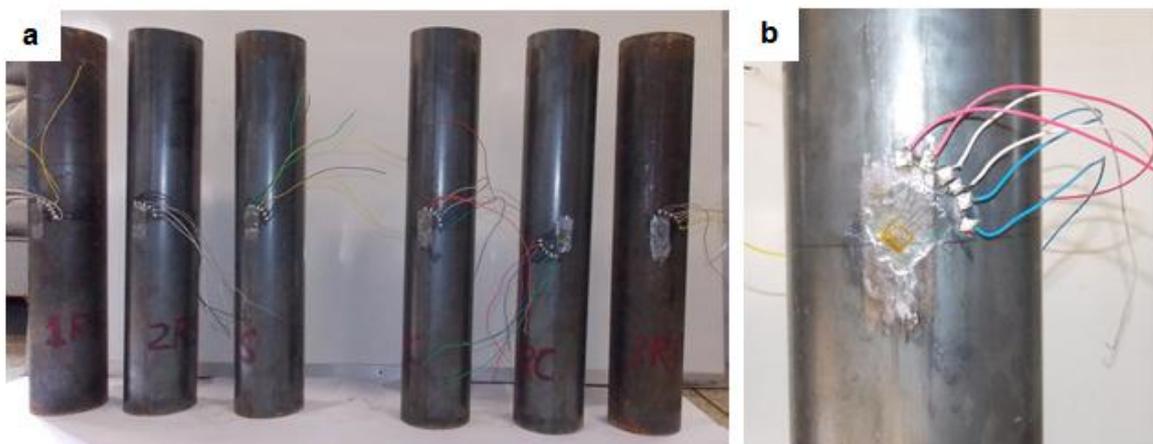


Figura 3.8 - a) Protótipos mistos usados para os ensaios de resistência à compressão; b) Detalhe da roseta instalada na parede externa do tubo.

3.9 Caracterização dos agregados

Os agregados graúdos e miúdos foram caracterizados de acordo com os seguintes parâmetros e referências normativas:

- Massa específica (agregado miúdo) – NBR NM 52:2009;
- Teor de material pulverulento (agregado miúdo) – NBR NM 46:2003;
- Massa específica e absorção de água (agregado graúdo) – NBR NM 53:2009;
- Massa unitária – NBR NM 45:2006;
- Granulometria – NBR NM 248:2003.

3.10 Análise por espectrometria de fluorescência de raios-x do aditivo expansor

A fim de determinar a constituição química do aditivo expansor MC-Quellmittel, foi conduzida uma análise qualitativa por Fluorescência de Raios X (FRX) procedida no Laboratório de Materiais de Construção Civil – UFOP. O equipamento utilizado foi o Panalytical Epsilon 3^x.

3.11 Ensaios piloto

Foram executados, para cada argamassa projetada (Tabela 3.4), 4 corpos-de-prova cilíndricos 5 x 10 cm (diâmetro x altura) para os testes de resistência à compressão (NBR 5739:2007), e 3 protótipos piloto, constituídos por membranas plásticas preenchidas com as argamassas, para a análise da variação volumétrica.

3.11.1 Resistência à compressão simples (NBR 5739:2007)

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples, todos os corpos-de-prova das argamassas experimentais foram inicialmente capeados com enxofre e em seguida solicitados axialmente com auxílio de uma prensa servo-controlada modelo DL 20000-EMIC e PC 200. A velocidade de aplicação de carga foi de 0,45 MPa/s até a ruptura do corpo-de-prova.

Após a realização do ensaio, a resistência à compressão foi calculada de acordo com a Equação 3.1:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Onde:

- f_c é a resistência à compressão (MPa);
- F é a carga de ruptura (kN);
- A é a área transversal do corpo-de-prova (m²).

3.11.2 Análise da variação volumétrica dos protótipos piloto

A variação volumétrica dos protótipos foi obtida por meio da técnica de pesagem hidrostática em balança Marte, modelo NX 8200S.

As determinações das massas das amostras (m), e das massas submersas (m_{sub}) foram realizadas logo após a moldagem e a cada 24 horas durante 28 dias. A temperatura da água foi aferida no momento de cada pesagem para a determinação da massa específica da água (d_f). Os volumes das amostras (v_s) ao longo dos 28 dias foram calculados de acordo com a Equação 3.2:

$$v_s = \frac{m - m_{sub}}{d_f} \quad (3.2)$$

3.12 Caracterização do concreto no estado endurecido

Os concretos leves foram caracterizados em seus estados endurecidos de acordo com os seguintes parâmetros e referências normativas:

- Resistência à compressão simples – NBR 5739:2007;
- Absorção de água, índice de vazios e massa específica – NBR 9778:2005;
- Módulo de elasticidade estático – NBR 8522:2008;
- Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8802:2013;

Para a avaliação dos parâmetros descritos foram executados, para cada um dos ensaios normatizados, 3 corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) de cada variação de concreto leve (CSA, CEX, CLAS).

O procedimento do ensaio de resistência à compressão foi o mesmo que o utilizado para as argamassas piloto, e encontra-se descrito no item 3.11.1.

3.12.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica (NBR 9778:2005)

Para a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica das matrizes projetadas, utilizou-se o seguinte procedimento: após 3 dias de idade, os corpos-de-prova foram secos em estufa por 72 horas e pesados para a determinação da massa seca (m_s). Posteriormente, foram imersos em água por 72 horas. Após esse intervalo de tempo, os corpos-de-prova foram colocados em recipiente cheio de água posto à fervura por 5 horas. Após o processo, as amostras foram pesadas em balança hidrostática para a obtenção da massa em condição de imersão (m_i). Em seguida, as superfícies das amostras foram enxutas com pano úmido para a determinação da massa em condição saturado superfície seca (m_{sat}).

A absorção de água (A) índice de vazios (I_v) e massa específica (ρ_r) foram determinados de acordo com as equações abaixo:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.3)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \times 100 \quad (3.5)$$

3.12.2 Módulo de elasticidade estático (NBR 8522:2008)

O ensaio de módulo de elasticidade estático foi realizado através de ciclos de carregamento e descarregamento em corpos-de-prova de 28 dias de idade. A medição das deformações foi feita por medidores elétrico resistivos unidirecionais (extensômetros) da marca EXCEL, modelo PA-06-800BA-120L, colados à superfície dos corpos-de-prova na posição vertical. A aquisição de dados foi realizada com auxílio de um *data logger* AGILENT, modelo 34972A.

Para a determinação do módulo de elasticidade estático, inicialmente, os corpos-de-prova foram carregados até a tensão limite superior, σ_b , a qual foi mantida por 60 segundos. Após esse intervalo de tempo, as amostras foram submetidas a um processo de descarregamento até uma tensão próxima de 0,0 MPa. Em seguida, foram novamente carregados a uma tensão de 0,5 MPa, mantida por 60 segundos. Realizou-se 4 ciclos de carregamento e descarregamento, e, ao final do processo, os corpos-de-prova obtiveram um acréscimo de carga, à razão de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, até a ruptura. O módulo de elasticidade estático (MPa) foi obtido de acordo com a Equação 3.6:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad (3.6)$$

Onde:

- σ_b é a tensão maior ($\sigma_b = 0,3f_c$);
- 0,5 é a tensão básica (MPa);
- ε_b é a deformação específica média sob tensão maior;
- ε_a é a deformação específica média sob tensão básica.

3.12.3 Módulo de elasticidade dinâmico (NBR 8802:2013)

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi utilizado um aparelho de ultrassom modelo TICO da marca PROCEQ. O equipamento fornece em seu visor a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova de concreto.

As superfícies superior e inferior dos corpos-de-prova aos 28 dias de idade foram polidas e em seguida cobertas por uma camada de vaselina para garantir bom contato entre o concreto e o transdutor. O módulo de elasticidade dinâmico (MPa) foi determinado de acordo com a Equação 3.7:

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (3.7)$$

Onde:

- ρ é a a massa específica (kg/m^3);
- V é a velocidade de onda (km/s);
- μ é o coeficiente de Poisson do concreto adotado como 0,2, conforme estabelecido pela norma.

3.13 Caracterização dos protótipos mistos aço-concreto

3.13.1 Investigação do efeito de expansão/contração do núcleo de concreto

O objetivo dessa investigação foi avaliar o comportamento dos núcleos de concreto de preenchimento (CSA, CEX e CLAS) quanto à expansão e contração durante o período de cura, tendo como informações as deformações identificadas pelos extensômetros nas faces dos tubos de aço.

Nessa investigação, os sinais dos sensores elétricos foram captados pelo sistema de aquisição de dados *Spider 8*, conectado a um computador. O processamento de sinais foi realizado pelo *software Catman*, que permite a monitoração, armazenamento e posterior emissão de relatórios. A aquisição de dados foi feita antes, durante e após a concretagem dos protótipos, durante os 28 dias de

cura dos núcleos de preenchimento. Observa-se na Figura 3.9 uma visão geral dos protótipos ensaiados.

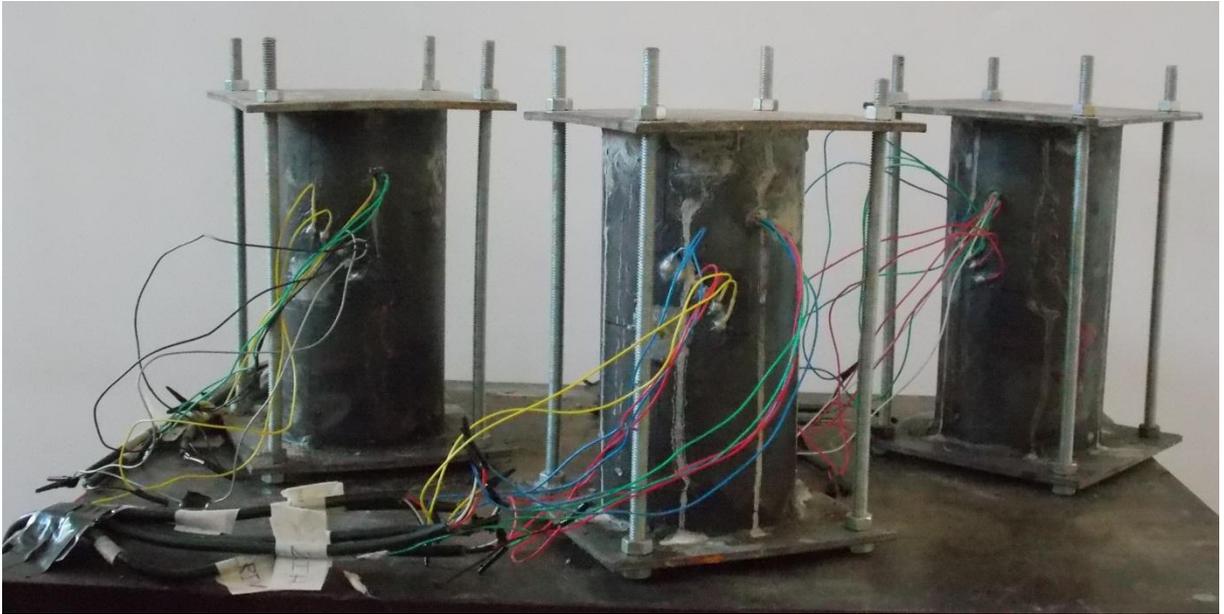


Figura 3.9 - Protótipos da investigação da expansão/contração dos núcleos de concreto.

Após o término do ensaio, a partir do relatório de dados, foram calculadas as deformações principais ϵ_1 e ϵ_2 (Equações 3.8 e 3.9) conhecendo-se as deformações nas direções x , y e 45 graus fornecidas pelas rosetas. A finalidade dos cálculos foi determinar as deformações máximas e mínimas dos núcleos dos concretos de preenchimento durante o período de cura. O mesmo tratamento de dados foi realizado nos ensaios de compressão.

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (3.8)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (3.9)$$

Sendo a distorção angular dada por:

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_{45} - (\epsilon_x + \epsilon_y) \quad (3.10)$$

Para essa investigação, foram utilizados 3 protótipos mistos, conforme especificados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Identificação e características dos protótipos para a investigação da expansão/contração do núcleo de concreto.

Protótipo	Preenchimento		Aço				
	Tipo	fck (MPa)	D (mm)	L (mm)	t (mm)	L/D	D/t
PCSA	Concreto leve sem adição	15	100	200	2	2,0	50
PCEX	Concreto leve com expensor	15	100	200	2	2,0	50
PCLAS	Concreto leve com LAS	15	100	200	2	2,0	50

Em relação à identificação da Tabela 3.6, a letra P é a abreviação de protótipo, seguido da especificação do tipo de concreto leve. O mesmo critério de identificação foi seguido pelos ensaios descritos a seguir.

3.13.2 Teste de cisalhamento

O propósito desses testes foi analisar o escorregamento relativo do núcleo de concreto dos protótipos mistos quando submetidos a uma carga de compressão. Além disso, os ensaios permitiram quantificar a força máxima aplicada para que os deslocamentos dos núcleos fossem possíveis. Dessa forma, as análises possibilitaram identificar a influência dos tipos de concreto leve na aderência dos componentes da seção mista e no efeito de confinamento.

Para a realização dos testes foi utilizada uma prensa servo-controlada, modelo DL 20000-EMIC e PC 200 com carga máxima de 2000 kN, tendo como critérios de parada o deslocamento permitido de 20 mm. Antes do correto posicionamento dos protótipos na prensa, suas bases de madeirite usinada de 20 mm de espessura foram retiradas, criando dessa forma, uma região sem preenchimento na base dos perfis, como se observa na Figura 3.7.

Duas placas de aço idênticas com diâmetros de 93 mm e espessuras de 12,5 mm foram corretamente posicionadas nas extremidades superiores dos núcleos de concreto para a aplicação uniforme da carga de compressão. Acima dessas placas, foi instalado um prolongador para compensação dimensional do equipamento. A fim de quantificar o deslocamento superior do núcleo, um deflectômetro EMIC, modelo EE05, foi posicionado sob as chapas de aço. Observa-se na Figura 3.10 a montagem e instrumentação do ensaio.

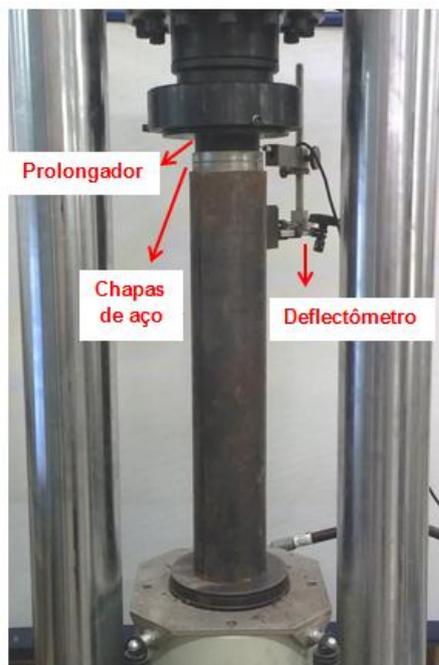


Figura 3.10 - Montagem e instrumentação para o teste de cisalhamento.

Após a instrumentação e a certificação do posicionamento dos protótipos mistos na prensa, iniciou-se o procedimento de aplicação de carga no núcleo de concreto. Foram submetidos a esses testes 3 protótipos, conforme especificados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Identificação e características dos protótipos para a investigação dos testes de cisalhamento.

Protótipo	Preenchimento		Aço				
	Tipo	fck (MPa)	D (mm)	L (mm)	t (mm)	L/D	D/t
PCSA	Concreto leve sem adição	15	100	550	2	5,5	50
PCEX	Concreto leve com expansor	15	100	550	2	5,5	50
PCLAS	Concreto leve com LAS	15	100	550	2	5,5	50

3.13.3 Microscopia óptica

Posteriormente à realização dos testes de cisalhamento, foi executado um corte a meia altura dos tubos com dimensões de 5 x 5 cm. O objetivo do procedimento foi a obtenção de amostras das paredes dos tubos de aço para análise microscópica com o intuito de investigar o desenvolvimento das tensões de aderência e confinamento. A estereoscopia foi realizada através de uma câmera HDCE-X5, com resolução de 5 megapixels, acoplada a um microscópio óptico Coleman NTB-3A, com aumento de 7 a 45x.

3.13.4 Resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto

A finalidade do ensaio de resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto foi comparar os valores de resistência à compressão dos concretos confinados (núcleos de preenchimento das seções mistas) com os dos concretos não confinados (corpos-de-prova ensaiados), e assim avaliar a influência dos tipos de concreto leve no efeito de confinamento e aderência dos componentes.

Para a realização desses ensaios foi utilizado o conjunto de prensa servo-controlada modelo DL 20000-EMIC e PC 200 com carga máxima de 2000 kN. Inicialmente, os protótipos foram devidamente localizados no equipamento de compressão. Duas placas idênticas de aço, com diâmetros de 93 mm e espessuras de 12,5 mm, foram posicionadas nas extremidades inferior e superior dos núcleos de concreto para uniformização da carga de compressão. Assim como nos testes de cisalhamento, acima da placa superior de aço foi colocado um prolongador para compensação dimensional da prensa. Em seguida, as rosetas de deformação a 45°, instaladas nas faces externas dos tubos, foram conectadas ao equipamento de aquisição de dados. Observa-se na Figura 3.11 o esquema de montagem e a instrumentação do ensaio.

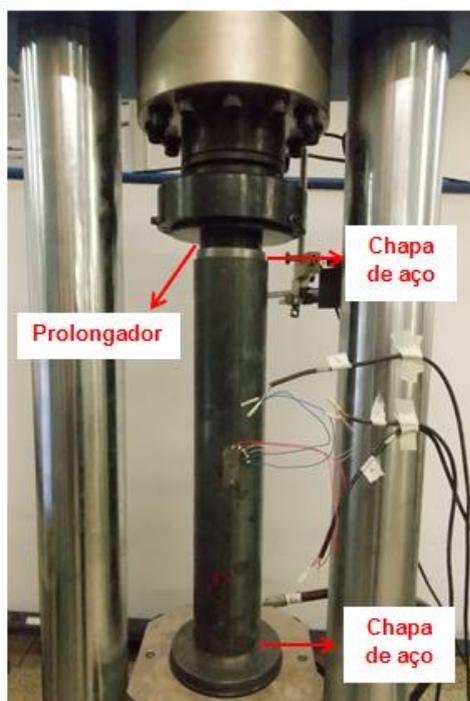


Figura 3.11 - Montagem e instrumentação para o ensaio de resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto.

Foram submetidos a esse ensaio 3 protótipos mistos, conforme especificados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Identificação e características dos protótipos para o ensaio de resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto.

Protótipo	Preenchimento		Aço				
	Tipo	fck (MPa)	D (mm)	L (mm)	t (mm)	L/D	D/t
PCSA	Concreto leve sem adição	15	100	550	2	5,5	50
PCEX	Concreto leve com expansor	15	100	550	2	5,5	50
PCLAS	Concreto leve com LAS	15	100	550	2	5,5	50

3.13.5 Resistência à compressão com carga aplicada à seção mista

O objetivo do ensaio de resistência à compressão com carga aplicada à seção mista foi avaliar a capacidade de carga dos protótipos mistos preenchidos e relacionar os valores desse parâmetro com resultados obtidos nos ensaios descritos anteriormente. Além disso, objetivou-se calcular e comparar o índice de força SI dos protótipos mistos conforme a Equação (2.2) (Ekmekyapar & Alleliw, 2016; Ding *et al.*, 2015; Han *et al.*, 2014).

A metodologia, a instrumentação e os equipamentos desse ensaio foram os mesmos que os utilizados para os testes de resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto. O único diferencial desse experimento foi a não utilização das placas de aço para aplicação de carga e uso de prolongador. Observa-se na Figura 3.12 o esquema de montagem e a instrumentação do ensaio.



Figura 3.12 - Montagem e instrumentação para o ensaio de resistência à compressão com aplicada à seção mista.

Foram submetidos a esse ensaio 3 protótipos, conforme especificados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Identificação e características dos protótipos para o ensaio de resistência à compressão com carga aplicada à seção mista.

Protótipo	Preenchimento		Aço				
	Tipo	fck (MPa)	D (mm)	L (mm)	t (mm)	L/D	D/t
PCSA	Concreto leve sem adição	15	100	550	2	5,5	50
PCEX	Concreto leve com expansor	15	100	550	2	5,5	50
PCLAS	Concreto leve com LAS	15	100	550	2	5,5	50

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados, nos ensaios piloto com argamassas e nos testes de caracterização dos concretos no estado endurecido. Finalmente, são expostos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos protótipos mistos.

4.1 Caracterização dos Agregados

4.1.1 Massa específica e massa unitária

Segundo Mehta & Monteiro (2014), os agregados leves apresentam massa unitária abaixo de $1,12 \text{ g/cm}^3$, enquanto os agregados miúdos naturais possuem massa unitária entre $1,52$ a $1,68 \text{ g/cm}^3$. Dessa forma, os valores encontrados para massa unitária, apresentados na Figura 4.1, estão de acordo com a faixa estabelecida.

De acordo com a fabricante CINEXPAN, a argila expandida tipo 1506 é equivalente à brita 0, enquanto a tipo 2215 pode ser utilizada em substituição à brita 1. Rodrigues (2016) determinou a massa específica dos dois tipos de brita gnáissica e obteve como resultado $2,66 \text{ g/cm}^3$ para as duas classificações do agregado. Ao relacionar o resultado encontrado pela autora com os apresentados na Figura 4.1, verifica-se que a argila expandida tipo 1506 apresenta massa específica, aproximadamente, 58% inferior à da brita 0, enquanto que a argila 2215, correspondente à brita 1, possui massa específica 76% inferior. Assim sendo, a substituição dos agregados convencionais por agregados de massa específica reduzida contribui para a produção de concretos consideravelmente mais leves.

Em relação ao agregado miúdo, o valor de massa específica obtido, foi equivalente ao encontrado por Souza (2015) para areia natural de mesma origem da caracterizada nesse estudo.

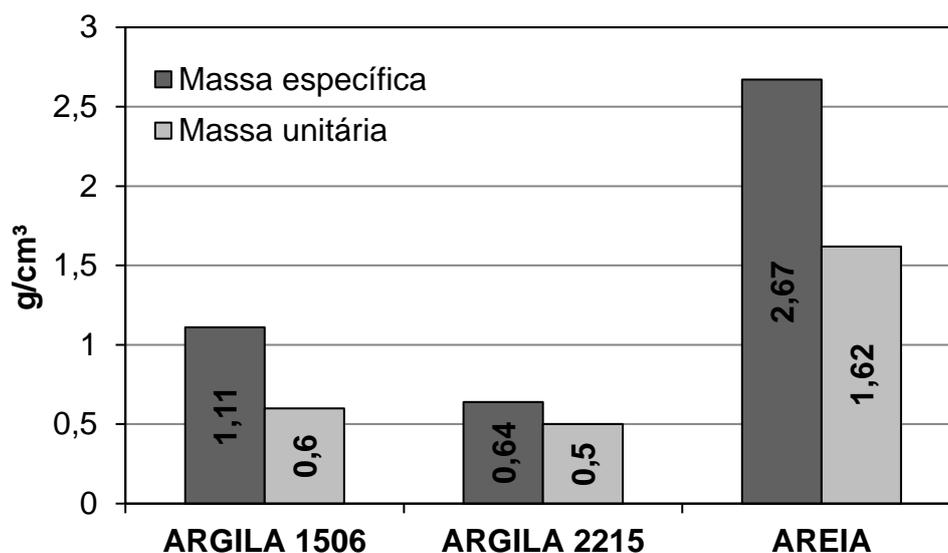


Figura 4.1 - Massa específica e massa unitária dos agregados.

4.1.2 Módulo de finura e dimensão máxima característica

A partir do ensaio de granulometria, pode-se definir a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados graúdos e miúdo conforme a Tabela 4.1. Os valores encontrados foram utilizados na determinação dos traços de concreto leve obtidos através de software computacional.

Tabela 4.1 - Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados.

Agregados		$D_{\text{máx}}$ característica (mm)	Módulo de finura
Graúdos	CINEXPAN 1506	12,5	6,19
	CINEXPAN 2215	25,0	7,09
Miúdo	AREIA	2,4	2,17

4.1.3 Teor de material pulverulento – agregado miúdo

Como resultado desse ensaio, obteve-se um teor de material pulverulento equivalente a 0,76%, bastante inferior ao limite máximo de 5% estabelecido pela NBR 7211:2011. Dessa forma, a areia caracterizada encontra-se dentro das especificações recomendadas e sua utilização como agregado não tende a comprometer a resistência mecânica e a trabalhabilidade das matrizes cimentícias.

4.1.4 Absorção de água – agregado graúdo

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.2, verifica-se que as argilas expandidas apresentam elevados índices de absorção de água, que estão relacionados à estrutura porosa de seus grãos. Essa absorção, quando não prevista, torna-se prejudicial à trabalhabilidade e a resistência mecânica do concreto, já que esses agregados podem absorver a água de hidratação do cimento. Dessa forma, as argilas foram utilizadas somente após completa saturação, conforme prescrições da NBR 12821:2009.

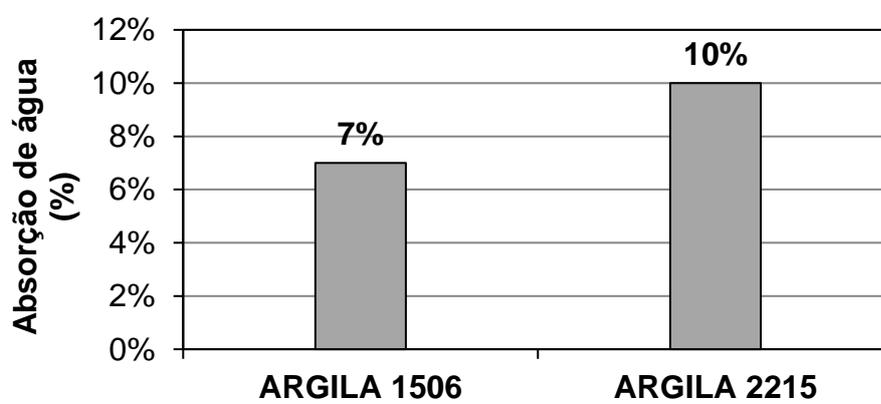


Figura 4.2 - Absorção de água (%) dos agregados graúdos.

4.2 Análise do aditivo expansor por espectrometria de fluorescência de raios - X

De acordo com os resultados obtidos, apresentados na Tabela 4.2, verifica-se que o aditivo expansor estudado apresenta maiores concentrações de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido sulfúrico (SO_3).

A análise de fluorescência de raios-x procedida por Carballosa *et al.* (2015) indicou que os expansores baseados em sulfoaluminato de cálcio são constituídos basicamente de alumina, óxido sulfúrico e óxido de cálcio. Já os aditivos à base de óxido de cálcio, são formados essencialmente desse composto (cerca de 96%) e não apresentam concentrações de alumina e óxido sulfúrico. Dessa forma, pode-se inferir que o expansor MC-Quellmittel utilizado nesse estudo tem como princípio ativo fundamental o sulfoaluminato de cálcio. A hidratação dos cimentos com esse tipo de

aditivo provoca a formação de agregados microcristalinos de etringita hexagonal ($3\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$), responsáveis pela expansão da matriz cimentícia.

Tabela 4.2 - Composição elementar do aditivo expensor.

Análise Qualitativa	
Elementos	Percentual
SiO ₂	71,49%
Al ₂ O ₃	11,42%
SO ₃	8,91%
CaO	3,61%
Na ₂ O	2,46%
MgO	1,38%
Fe ₂ O ₃	0,11%
P ₂ O ₅	0,40%

4.3 Ensaio piloto

4.3.1 Resistência à compressão das argamassas

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.3, verifica-se que as matrizes dosadas com expensor apresentaram resistências mais próximas à da argamassa de referência (SD). De acordo com Carballosa *et al.* (2015) os expansores à base de sulfoaluminato não alteram em grande escala a resistência das matrizes, o que de fato foi observado nesse estudo.

A adição de incorporador de ar reduz consideravelmente a resistência das matrizes cimentícias. Esse decréscimo é derivado do aumento da porosidade da matriz e foi comprovado por Mendes *et al.* (2017) com análise microestrutural e índice de vazios em argamassas aditivadas com LAS.

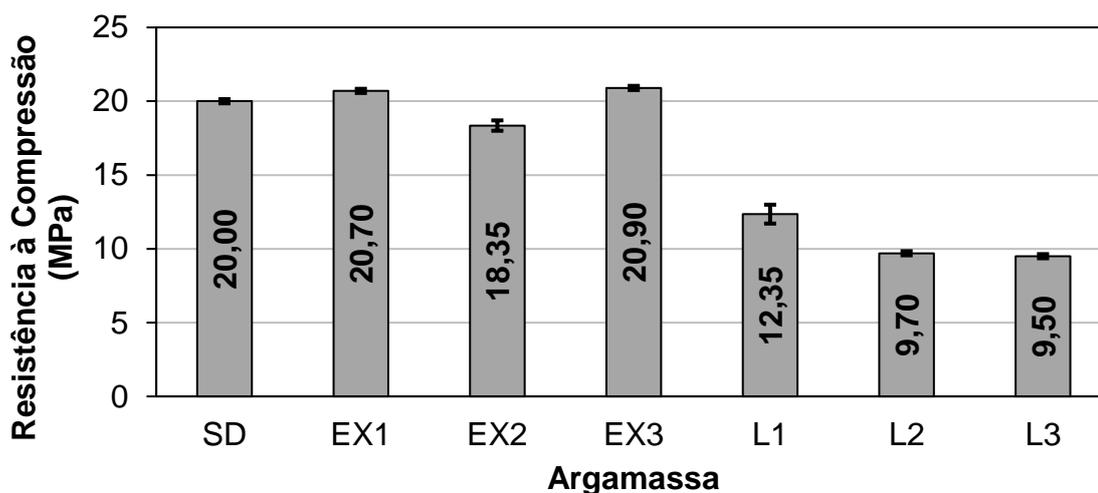


Figura 4.3 - Resistência à compressão das argamassas.

4.3.2 Análise da variação volumétrica das argamassas

Os volumes dos protótipos piloto foram mensurados continuamente durante os 28 dias de cura por meio da metodologia especificada, e dessa forma, foi possível determinar a variação volumétrica das argamassas estudadas ao longo do período.

De acordo com a Figura 4.4, observa-se que os protótipos EX3, dosados com 1,0% de expensor, apresentaram expansão durante todo o período de cura. Aos 28 dias, o aumento de volume correspondeu a aproximadamente 4,5%. Os protótipos EX1 e EX2, dosados respectivamente com 0,1% e 0,5% de expensor, tiveram comportamentos similares entre si. Durante os primeiros dias experimentaram certa retração e a partir do décimo dia foi verificada expansão das argamassas. Percebe-se que os modelos EX1 e EX2 apresentaram desempenho bastante próximo ao dos protótipos SD ao longo do período, obtendo praticamente os mesmos aumentos de volume aos 28 dias, cerca de 2,0%. Portanto, a menor dosagem e a dosagem intermediária de expensor não provocaram mudanças significativas em termos de expansão ao serem comparadas com as amostras usadas como referência.

Observa-se na Figura 4.5 que os protótipos L2, dosados com 0,1% de LAS, apresentaram comportamento bastante semelhante às amostras EX3, expandiram durante os 28 dias e obtiveram a maior variação volumétrica comparada às demais dosagens, aproximadamente 3,7%. Por outro lado, as amostras L1 e L3, dosadas respectivamente com 0,05% e 0,15% de LAS, tiveram desempenhos próximos aos

dos modelos EX1 e EX2, com retração nos primeiros dias e posterior expansão. Ao longo de todo o período, a expansão das argamassas L1 foi menor em relação à das argamassas de referência, podendo-se inferir que a menor dosagem de LAS não alcançou o objetivo esperado.

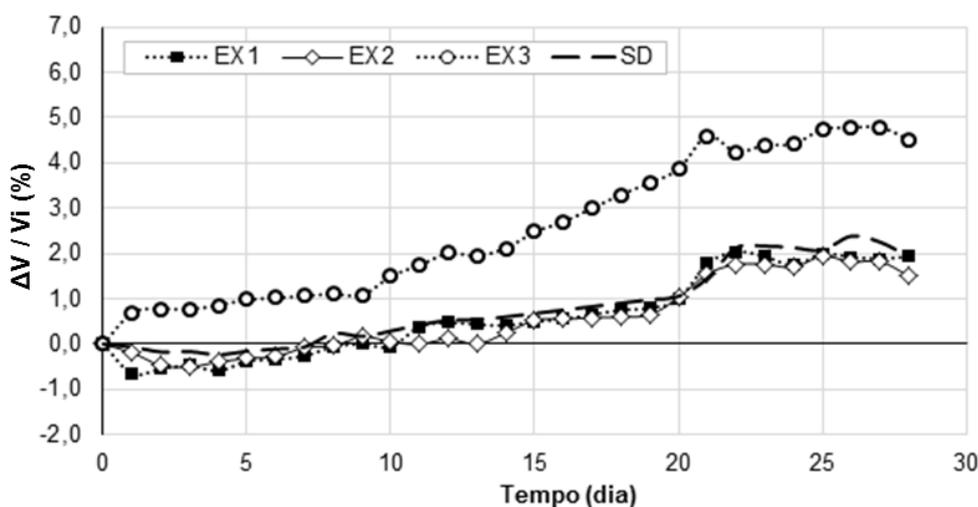


Figura 4.4 - Variação volumétrica das argamassas dosadas com expansor.

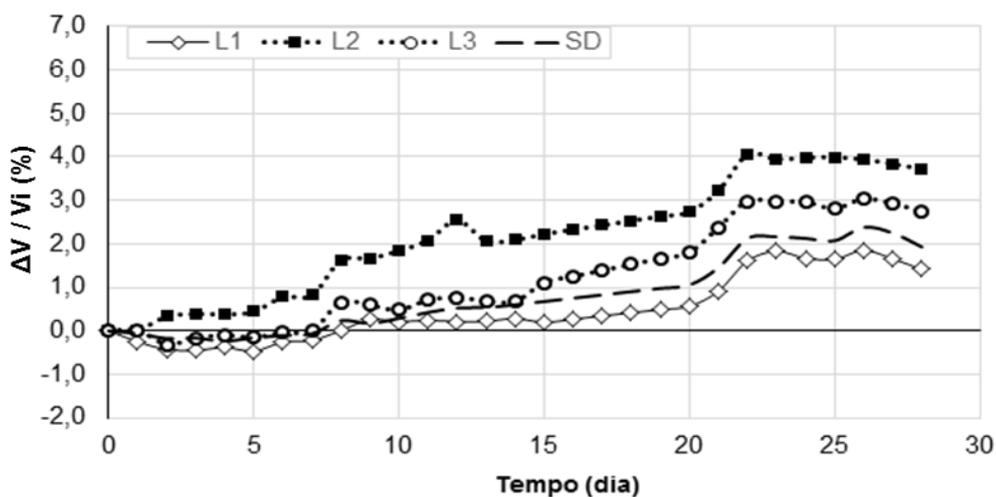


Figura 4.5 - Variação volumétrica das argamassas dosadas com LAS.

4.3.3 Definição das dosagens ótimas de aditivos.

O objetivo dos testes realizados em argamassas foi a obtenção das dosagens ótimas de expansor e LAS que proporcionassem expansão máxima com perda mínima de desempenho mecânico.

De acordo com a Figura 4.6 verifica-se que a dosagem de 1,0% de expansor é bastante adequada para se obter expressiva expansão com elevada resistência mecânica da matriz cimentícia. Observa-se na Figura 4.7, que há um indicativo de 0,065% como sendo a dosagem adequada de LAS. No entanto, para esse percentual não há expressiva variação volumétrica, é um ponto de transição onde se finaliza a retração e se inicia a expansão da argamassa. A dosagem mais apropriada é a de 0,1% de LAS, através da qual se obtém significativo aumento de volume mesmo apresentando resistência reduzida.

Diante dos resultados apresentados, pode-se inferir que as dosagens de 1,0% de expansor e de 0,1% de LAS melhoraram o desempenho das matrizes cimentícias em relação ao objetivo proposto. Dessa forma, essas porcentagens de aditivos em relação à massa de cimento foram as utilizadas na execução dos concretos CEX e CLAS para o preenchimento dos tubos de aço.

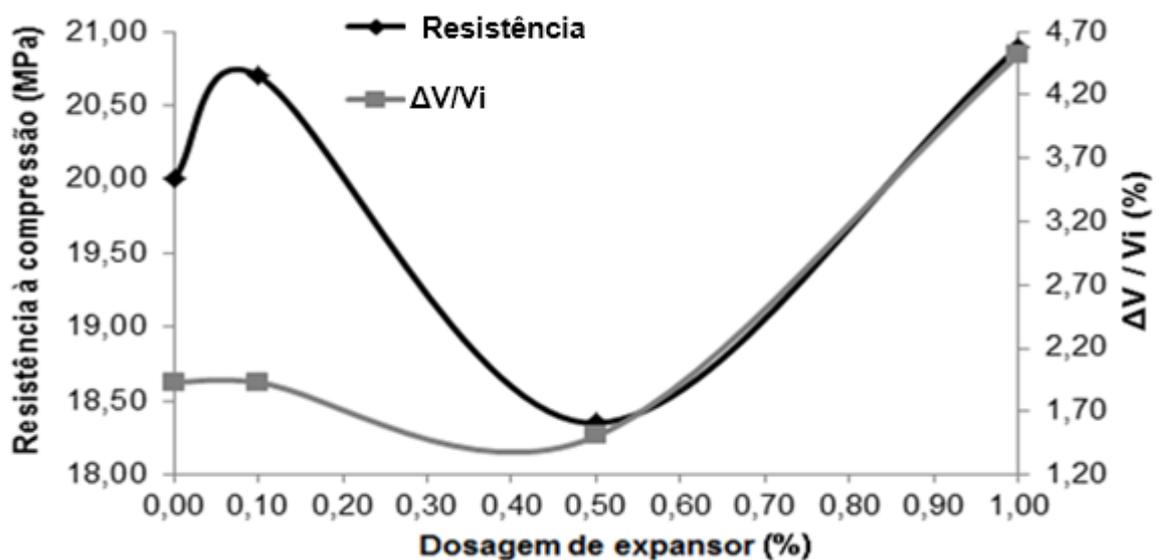


Figura 4.6 - Relação entre resistência à compressão e expansibilidade para diferentes dosagens de expansor.

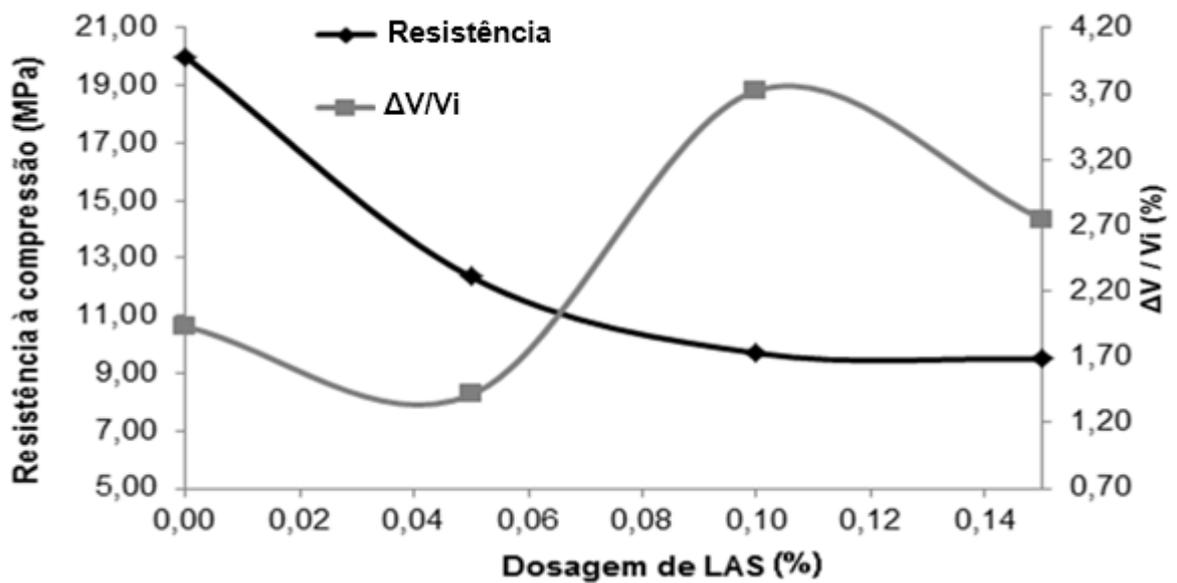


Figura 4.7 - Relação entre resistência à compressão e expansibilidade para diferentes dosagens de LAS.

4.3.4 Resistência à compressão dos concretos leves

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.8, pode-se verificar que o concreto leve dosado com expansor (CEX) apresentou valor de resistência bem próximo com o encontrado para o concreto leve de referência (CSA). Esse comportamento, que também foi verificado nos ensaios de resistência à compressão das argamassas piloto, comprova as observações de Carballosa *et al.* (2015). Os autores observaram que o aditivo expansor do tipo sulfoaluminato não modifica substancialmente a resistência dos concretos.

Por outro lado, o concreto dosado com LAS (CLAS) apresentou expressiva redução de resistência mecânica, cerca de 42% menor que a encontrada para o concreto de referência. Essa diminuição, ocasionada pela adição de incorporador de ar, é explicada pelo significativo aumento da porosidade da matriz cimentícia e foi comprovada por Mendes *et al.* (2017) e Chen & Zhou (2013).

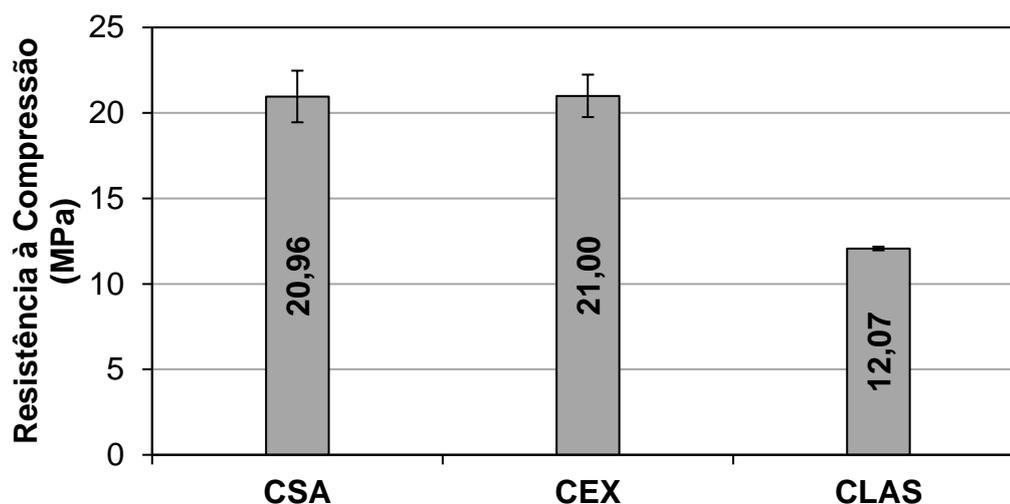


Figura 4.8 - Resistência à compressão dos concretos leves.

4.3.5 Absorção de água e índice de vazios dos concretos leves

Como previsto, o concreto com aditivo alternativo LAS foi o que apresentou o maior índice de vazios comparado aos demais, cerca de 36% superior ao encontrado para o concreto leve sem adição. Esse dado comprova que o LAS, princípio ativo dos detergentes domésticos, é um agente estável que assegura a manutenção do teor de ar incorporado do estado fresco para o estado endurecido, como confirmado pelos estudos de Mendes *et al.* (2017). O aumento da porosidade da matriz, ocasionada pela adição desse composto químico, se traduz em elevada absorção de água, conforme se observa na Figura 4.9.

O concreto com expansor também apresentou percentuais de índice de vazios e absorção de água maiores que os obtidos para o concreto sem adição. Isso pode ser explicado pelo fato de que, os expansores à base de sulfoaluminatos promovem a formação de pequenas bolhas de ar no estado fresco que se mantém no estado endurecido, como observado nos estudos de Carballosa *et al.* (2015) e relatado na ficha técnica do aditivo utilizado. No entanto, esse aumento de vazios não significou redução de resistência mecânica da matriz, como se observa na Figura 4.8. Diante disso, foi procedida uma análise térmica em fragmentos de corpos-de-prova rompidos à compressão após 6 meses de cura, para justificar esse achado. As amostras foram moídas em moinho de alta energia, Retsch PM100, durante 5 minutos a 400 rpm, utilizando jarro e esferas de zircônia. A análise foi procedida no Laboratório de Materiais de Construção Civil/UFOP, equipamento Shimadzu DTG- 60H, de 25 a

1000° C, passo de 10 °C/min⁻¹ e atmosfera inerte de N₂ (25ml min⁻¹). A partir dessa análise foi possível verificar e quantificar as fases contidas na pasta de cimento endurecida (Tabela 4.3), tendo em vista que os produtos de hidratação do cimento Portland sofrem perda de água em intervalos específicos de temperatura:

- 100 ° C: Desidratação da água dos poros (Ramachandran *et al.*, 2002);
- 115 - 125 ° C: Desidratação do CSH (silicato de cálcio hidratado) (Ramachandran *et al.*, 2002);
- 120 – 130 ° C: Desidratação da etringita (Ramachandran *et al.*, 2002);
- 400 – 460 ° C: Desidratação do Ca(OH)₂ (Defávári, 2016);
- 600 – 700 ° C: Descarboxinação do CaCO₃ (Defávári, 2016);

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.3, pode-se verificar que o teor de cálcio presente no concreto CEX foi menor que para os demais tratamentos. Dessa forma, pode-se inferir que o cálcio presente nessa matriz tenha se recombinao com outros elementos formando produtos de hidratação os quais contribuíram para a resistência mecânica do concreto compensando a perda de resistência esperada pelo aumento da porosidade. Pode-se verificar também que o concreto CEX foi o tratamento que apresentou maior perda de massa referente à etringita (intervalo 120-130° C), cerca de 10% superior a verificada para o concreto de referência CSA. A maior formação de etringita no concreto CEX está relacionada com a adição do aditivo expensor do tipo sulfoaluminato, cujo princípio ativo é induzir a expansão da matriz cimentícia por meio da formação desse produto de hidratação.

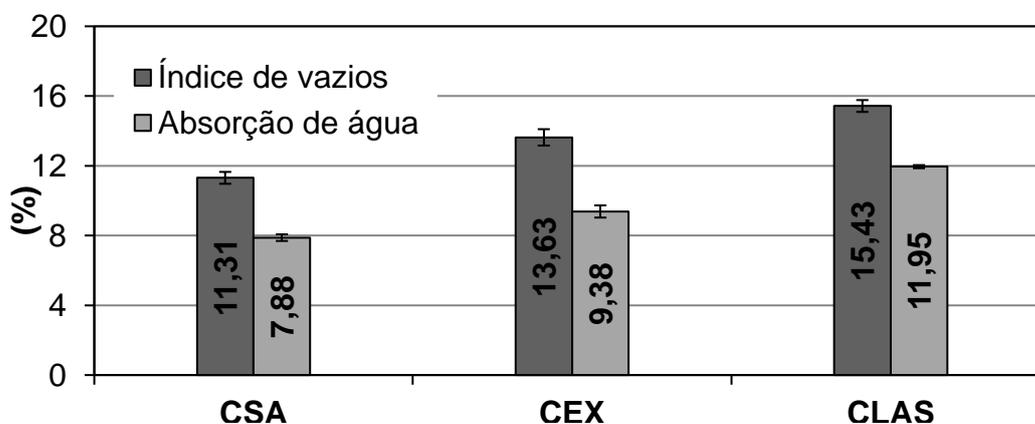


Figura 4.9 - Absorção de água e índice de vazios.

Tabela 4.3 - Perdas de massa dos concretos leves.

Concreto leve	Perda de massa			
	CSH (%)	Etringita (%)	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)
CSA	0,26583	0,27138	0,41590	1,56184
CEX	0,27896	0,29888	0,54165	0,20905
CLAS	0,27047	0,25729	0,36812	1,56827

4.3.6 Massa específica dos concretos leves

De acordo com a ABNT NBR 8953:2009, uma das particularidades do concreto leve é possuir massa específica abaixo de 2 g/cm³, o que de fato foi verificado em todas as variações de concreto leve ensaiadas, como se observa na Figura 4.10.

A menor massa específica encontrada, como esperado, foi a do concreto CLAS, devido ao aumento da porosidade da matriz cimentícia ocasionada pelo incorporador de ar.

Observa-se que o concreto com expansor, mesmo apresentando microporos em sua matriz, como verificado no item anterior, apresentou praticamente o mesmo valor de massa específica do concreto sem adição. Isso pode ser explicado baseado nos resultados encontrados na análise térmica procedida. O concreto CEX foi o tratamento que apresentou menor concentração de cálcio, podendo-se inferir que esse elemento tenha se recombinao com outros elementos formando produtos de hidratação, os quais compensaram a perda de massa específica esperada pelo aumento da porosidade.

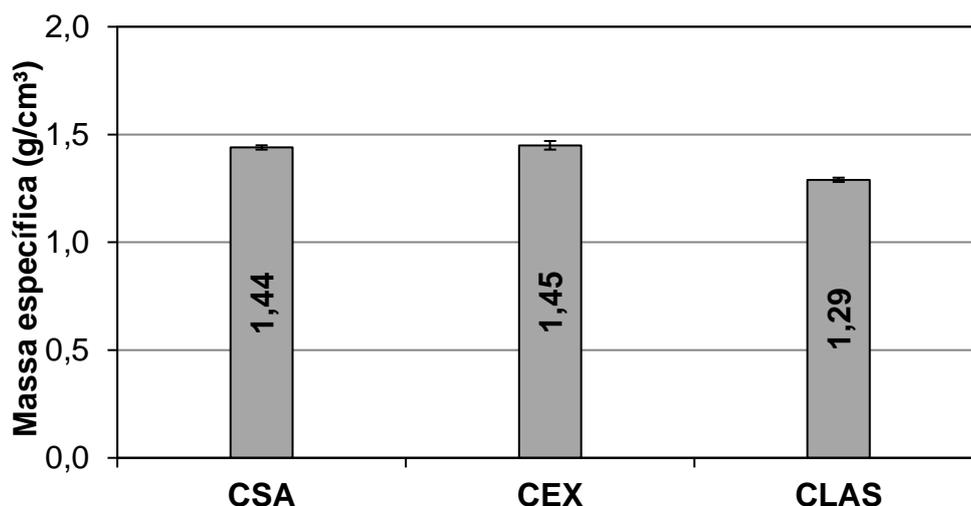


Figura 4.10 - Massa específica das variações de concreto.

4.3.7 Módulo de elasticidade dos concretos leves

De acordo com Metha e Monteiro (2014), Romano (2013), Mendes *et al.* (2017) o módulo de elasticidade dinâmico está intimamente relacionado com a porosidade da matriz cimentícia e a interconexão de seus vazios. O valor desse parâmetro, obtido por meio da velocidade de ondas ultrassônicas, decai com o aumento de poros presentes na matriz. Dessa forma, constata-se que os valores obtidos para os módulos de elasticidade dinâmicos, apresentados na Figura 4.11, estão em consonância com os resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios dos concretos, a partir dos quais verificou-se que o CLAS é o tratamento que possui maior teor de ar incorporado e que o CEX apresenta microporos promovidos pelo aditivo expansor.

Segundo Santos *et al.* (2013), o módulo de elasticidade estático avalia o comportamento efetivo da estrutura, o desempenho do material a ser utilizado, e por isso relaciona-se diretamente com a resistência à compressão dos concretos. Conforme Dilli *et al.* (2015), de forma geral, o aumento de resistência mecânica da matriz implica em acréscimo desse módulo, o que de fato foi verificado. No entanto, observa-se que o valor desse parâmetro não foi afetado na mesma intensidade que a resistência à compressão dos concretos, uma vez que a resistência mecânica do CEX foi ligeiramente maior que a do CSA e, no entanto seu módulo estático foi cerca de 23% maior que o encontrado para o concreto de referência.

O elevado módulo de elasticidade estático do concreto dosado com aditivo expensor pode estar relacionado com a recombinação do cálcio presente nessa matriz com outros elementos, formando produtos de hidratação que compensaram a perda de resistência esperada pelo aumento da porosidade, contribuindo para a rigidez do material. Por outro lado, o concreto CLAS foi a variação que apresentou o menor módulo de elasticidade estático, cerca de 30% menor que o identificado para o concreto de referência. O valor reduzido desse parâmetro, que está associado à elevada porosidade da matriz, implica em maior deformabilidade do material ao ser submetido à cargas axiais.

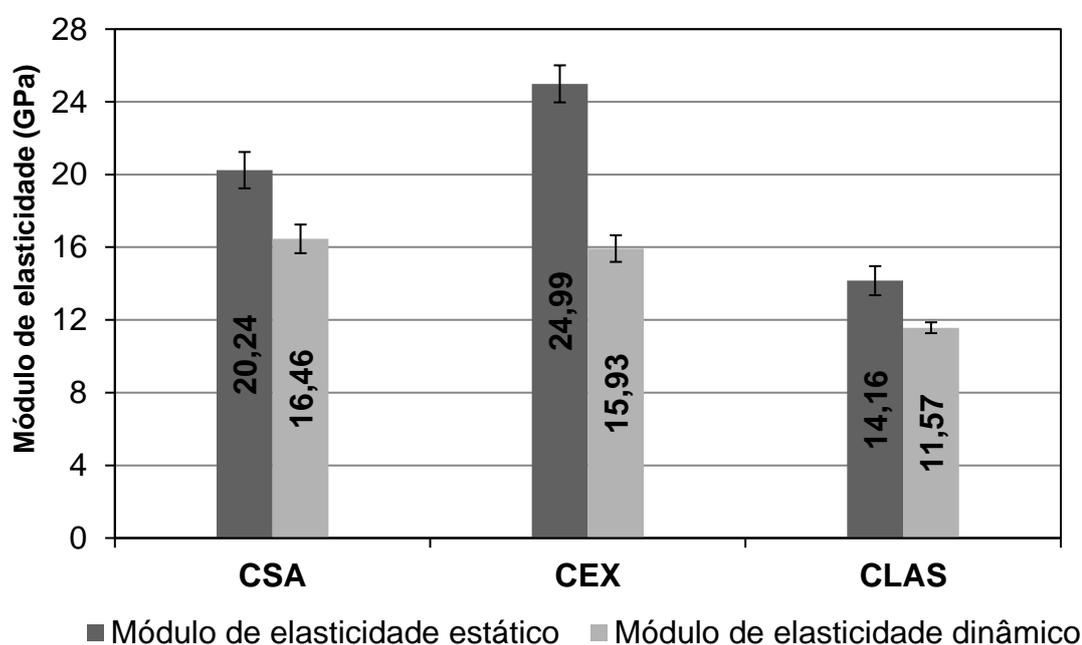


Figura 4.11 - Módulos de elasticidade.

4.4 Caracterização dos protótipos mistos aço-concreto

4.4.1 Investigação da expansão/contração do núcleo de concreto

A partir da análise dos dados dos extensômetros internos dos tubos, apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13, é possível observar que, durante o período de cura, o núcleo de concreto leve de referência (CSA) apresentou certa expansão na direção principal 1 e considerável retração na direção principal 2, identificada pelo expressivo decréscimo das deformações provocadas na parede do tubo de aço nessa direção. Pode-se, portanto, inferir que no geral, houve contração desse núcleo de

preenchimento durante a cura, relacionada com o consumo de água da matriz cimentícia devido à geração dos produtos de hidratação.

Em relação ao CEX, observa-se que o concreto apresentou significativa expansão na direção principal 1 a partir do primeiro dia de cura, e reduzida retração na direção principal 2. Dessa forma, o acréscimo de tensão aplicada ao tubo de aço pelo núcleo de concreto expansivo, além de compensar a retração convencional, induziu um efeito de confinamento contribuindo para uma maior força de ligação na interface da seção mista (Xu *et al.*, 2009; Kai-Cheng *et al.*, 2011).

Quanto ao CLAS, pode-se observar que esse núcleo de preenchimento ao final do período de cura, apresentou reduzida expansão na direção principal 1 e praticamente nenhuma deformação na direção principal 2, o que retrata uma certa constância de volume desse tipo de concreto.

Comparando-se os gráficos apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13, com os gráficos exibidos nas Figuras 4.14 e 4.15, pode-se constatar que houve uma divergência entre as leituras internas e externas dos extensômetros. Efetivamente, os medidores fixados nas faces internas dos tubos de aço detectaram com maior sensibilidade as variações de expansão e contração dos núcleos de preenchimento. Por outro lado, as leituras dos extensômetros externos estiveram mais suscetíveis a variações dimensionais devido à espessura dos tubos e do aperto das chapas superiores conectadas aos protótipos.

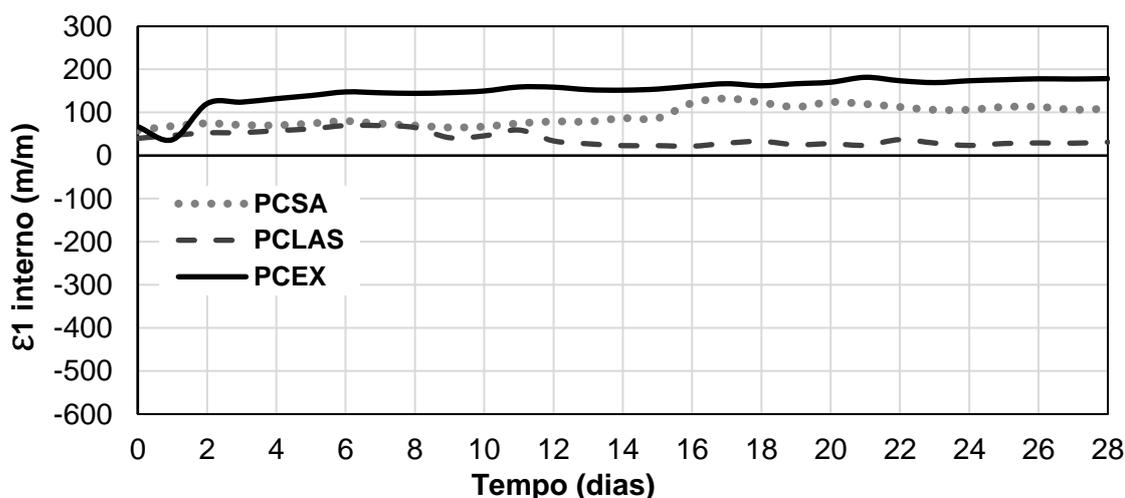


Figura 4.12 - Deformação ϵ_1 interna x tempo de cura dos núcleos de preenchimento.

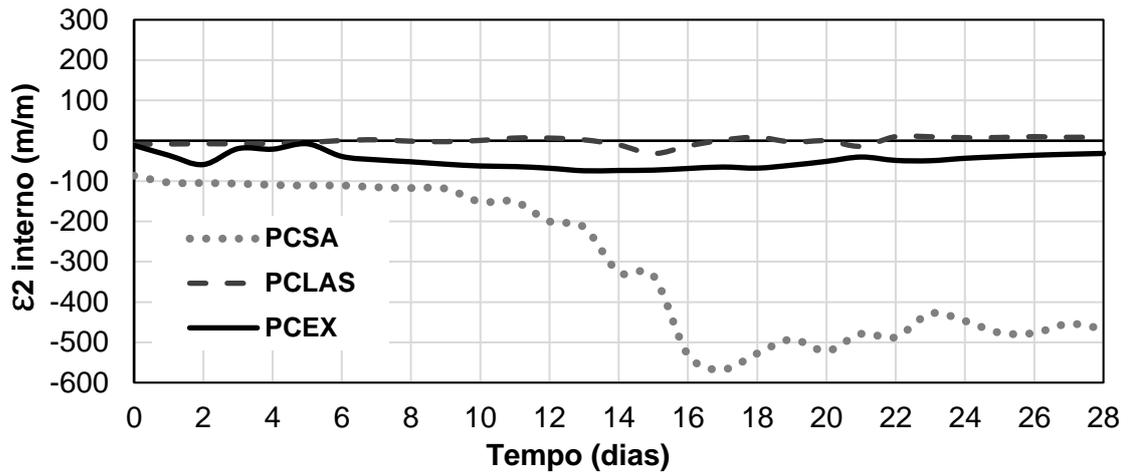


Figura 4.13 - Deformação ϵ_2 interna x tempo de cura dos núcleos de preenchimento.

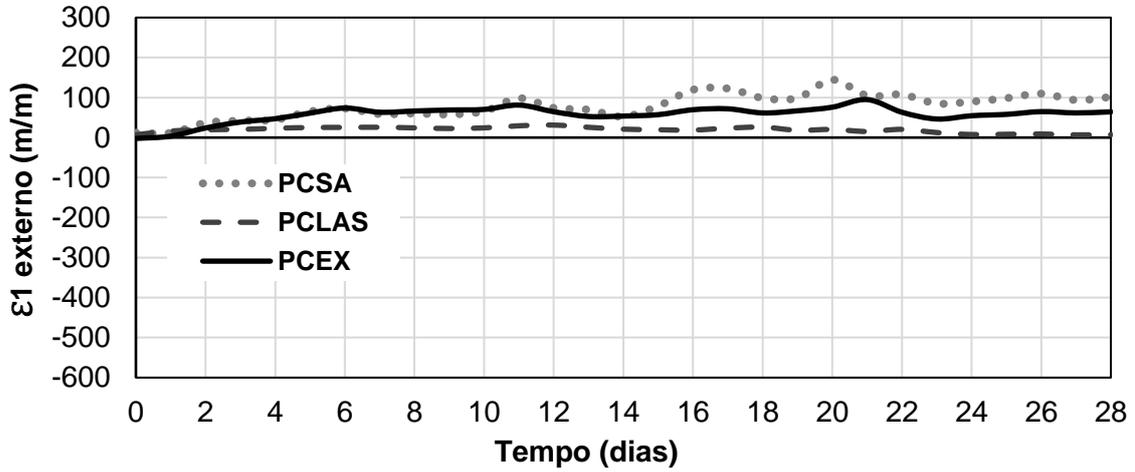


Figura 4.14 - Deformação ϵ_1 externa x tempo de cura dos núcleos de preenchimento.

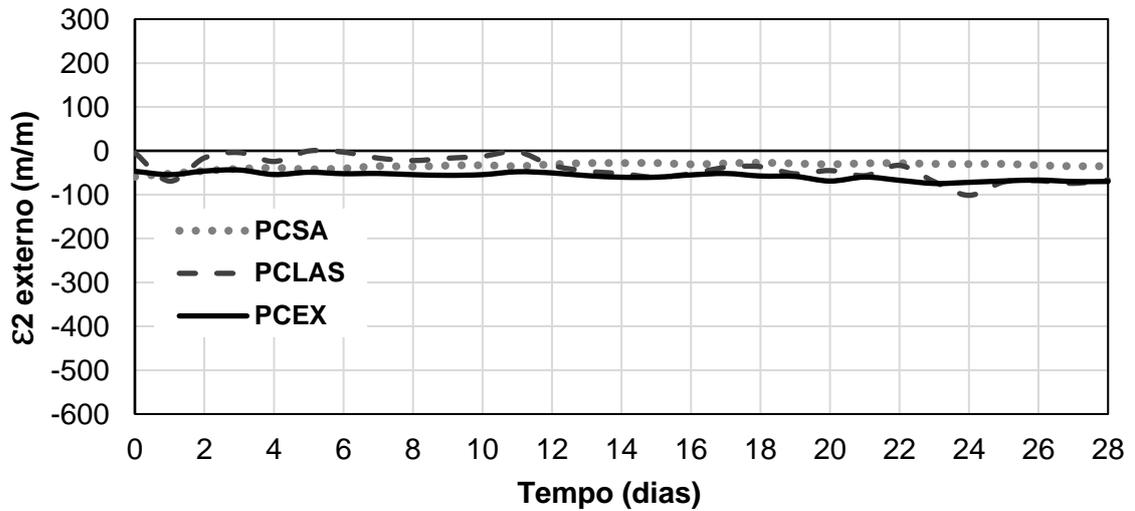


Figura 4.15 - Deformação ϵ_2 externa x tempo de cura dos núcleos de preenchimento.

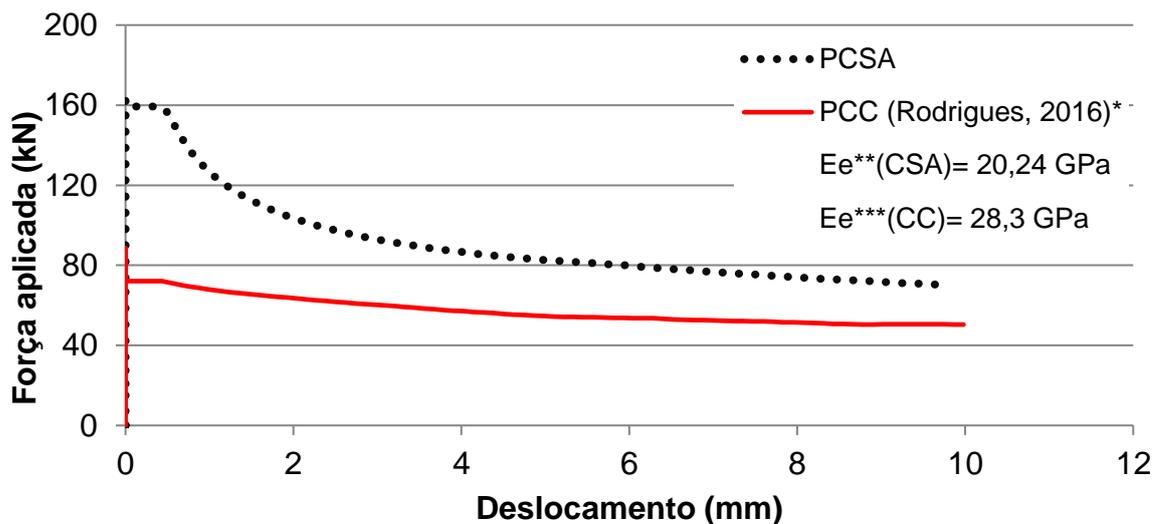
4.4.2 Teste de cisalhamento

Analisando o desempenho do protótipo PCSA (Figura 4.16), verifica-se que o protótipo misto resistiu a um aumento de carga sem apresentar deslocamento do núcleo de concreto, até ser alcançado o valor da força máxima de compressão, correspondente a 160 kN. Atingida essa carga, a adesão é rompida e o diagrama passa a apresentar um estreito trecho linear em que ocorre manutenção da carga durante um curto intervalo de deslocamento, caracterizando a aderência mecânica. Após o estreito trecho, o diagrama apresenta uma redução contínua da carga de compressão com expressivo acréscimo de deslocamento, identificando a completa perda de aderência entre os elementos da seção mista. Comportamento similar ao do PCSA foi verificado para o perfil de parede fina preenchido com concreto convencional (PCC) estudado por Rodrigues (2016). No entanto, constata-se que a carga máxima alcançada pelo protótipo com núcleo de concreto leve foi, aproximadamente, 80% superior à identificada para o PCC. O menor módulo de elasticidade do concreto leve utilizado (28,5% inferior ao obtido para o concreto convencional) é um fator que propicia maior deformação radial desse núcleo de preenchimento quando submetido à compressão, gerando aumento do efeito confinante e da aderência na interface.

Em relação ao comportamento do perfil misto PCEX (Figura 4.17), observa-se que o protótipo resistiu a uma grande parcela de esforço sem que houvesse deslocamento relativo do núcleo de concreto. Atingida a carga máxima de compressão de 190 kN (19% superior à do protótipo de referência), verifica-se que houve um decréscimo da força sem que ocorresse deslizamento do núcleo. Esse desempenho é atribuído à forte ligação presente na interface aço-concreto desse protótipo, que se traduz em elevada adesão entre os materiais da seção. A investigação do efeito de expansão/contração do núcleo de concreto realizada e os estudos de Xu *et al.*, (2009) e de Kai-Cheng *et al.*, (2011) constataram que o aumento da expansão de concretos CEX durante o seu período de endurecimento, além de compensar a retração do núcleo, induz tensões no tubo metálico gerando tensões de confinamento, proporcionando melhora significativa da aderência química entre os componentes da seção mista. A adesão foi rompida pela carga de compressão aproximada de 170 kN e a partir de então, o diagrama passou a apresentar um pequeno trecho linear, semelhante ao observado no gráfico de PCSA, caracterizando a aderência mecânica.

Por fim, ocorreu um decréscimo contínuo da carga aplicada com aumento de deslocamento, evidenciando a completa perda de aderência entre os materiais.

Em relação ao protótipo PCLAS (Figura 4.18), verifica-se que a seção apresentou um comportamento bastante diferenciado dos demais. O diagrama indica que a adesão foi perdida a partir de tensões relativamente pequenas. Posteriormente, ocorre uma acentuada inclinação da curva, denotando o aumento de deslocamento com acréscimo da carga de compressão, caracterizando a manifestação da aderência mecânica e por atrito. De acordo com Rodrigues (2016), as predominâncias desses mecanismos de aderência estão relacionadas com a maior rugosidade e irregularidades superficiais do núcleo de concreto com ar incorporado, o que gera aumento do coeficiente de atrito na interface aço-concreto. Além disso, o menor módulo de elasticidade dessa variação de concreto permite que o material, ao ser submetido à compressão axial, apresente maior deformação e expansão radial contribuindo para o aumento do efeito de confinamento e da aderência mecânica. A completa perda de aderência entre os componentes dessa seção mista ocorreu com uma carga de compressão mais baixa do que as verificadas para os demais protótipos, cerca de 18% menor que a do modelo de referência. Essa redução está relacionada com a menor resistência à compressão encontrada para o concreto CLAS, 42% inferior a do concreto de referência CSA. No entanto, essa relação permite constatar que o efeito de confinamento e os mecanismos de aderência foram bastante manifestados no protótipo misto PCLAS a ponto de compensar a reduzida resistência do concreto com ar incorporado e contribuir para uma maior força de ligação na interface.



* Refere-se ao perfil tubular SAE 1020 de 2 mm de espessura e 550 mm de comprimento preenchido com concreto convencional classe C₁₅ proposto por Rodrigues (2016). ** Refere-se ao módulo de elasticidade estático do concreto leve sem adição. *** Refere-se ao módulo de elasticidade estático do concreto convencional (Rodrigues, 2016).

Figura 4.16 - Força x deslocamento do núcleo de concreto do protótipo PCSA.

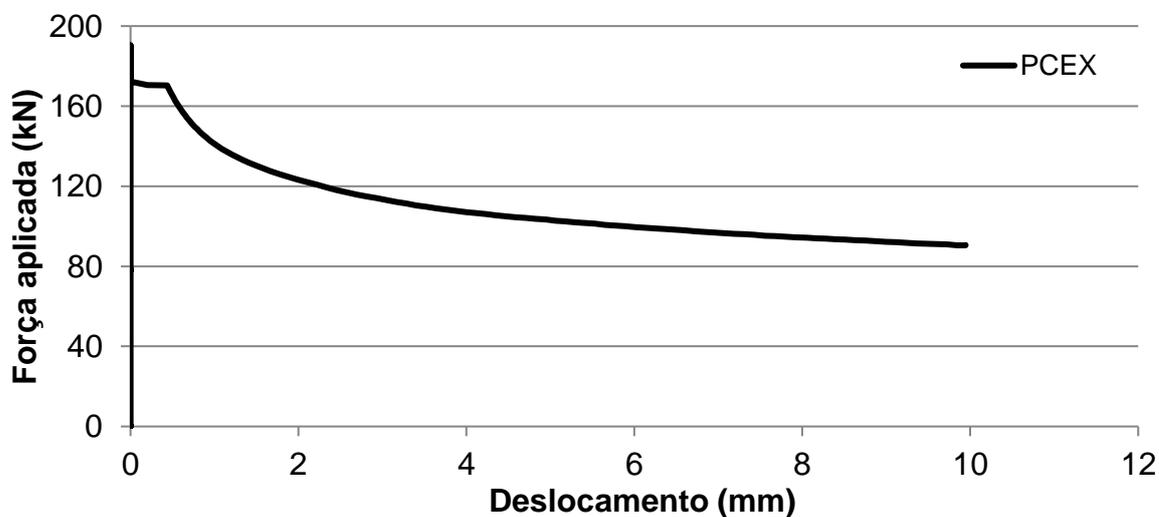


Figura 4.17 - Força x deslocamento do núcleo de concreto do protótipo PCEX.

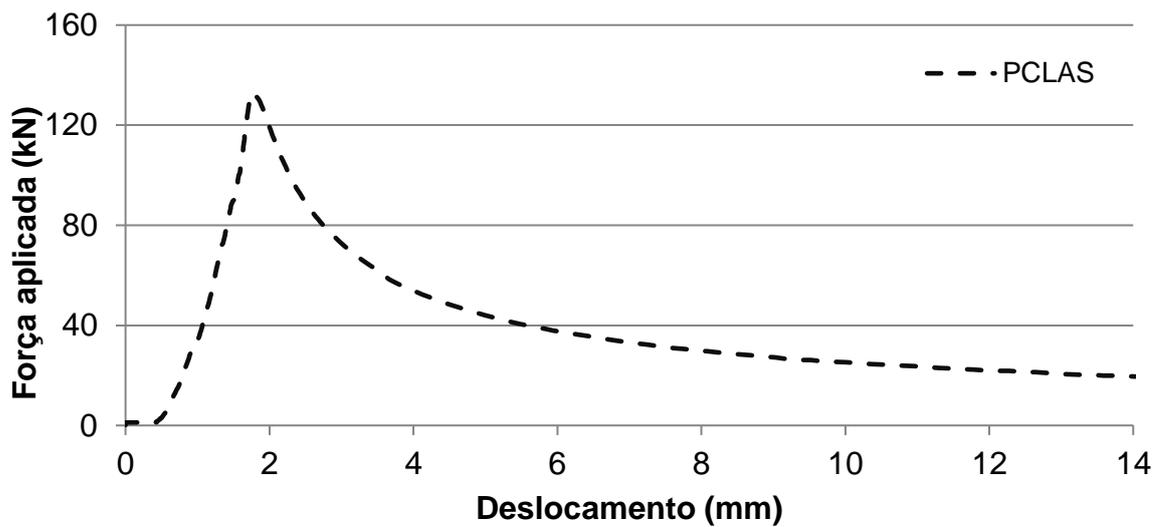


Figura 4.18 - Força x deslocamento do núcleo de concreto do protótipo PCLAS.

4.4.3 Microscopia óptica

Comparando as Figuras 4.19 e 4.20, observa-se que a quantidade de concreto residual aderido às paredes de aço presente na amostra PCSA é significativamente maior que a encontrada nas imagens do PCC. Essa análise corrobora com os resultados obtidos no item 4.4.2, no qual foi evidenciada uma maior aderência na interface entre os componentes do protótipo preenchido com concreto leve. De fato, o menor módulo de elasticidade do concreto leve de preenchimento é um fator que contribui para uma maior aderência e aumento da reação de confinamento entre os componentes da seção mista.

Em relação às Figuras 4.21 e 4.22, é possível identificar a presença de ranhuras nas amostras derivadas do escorregamento dos concretos durante o ensaio. Essas marcas podem ser relacionadas com a maior resistência na interface presentes nesses protótipos, devido à elevada adesão aço-concreto identificada no PCEX, e a forte manifestação da aderência mecânica e por atrito verificadas no PCLAS.

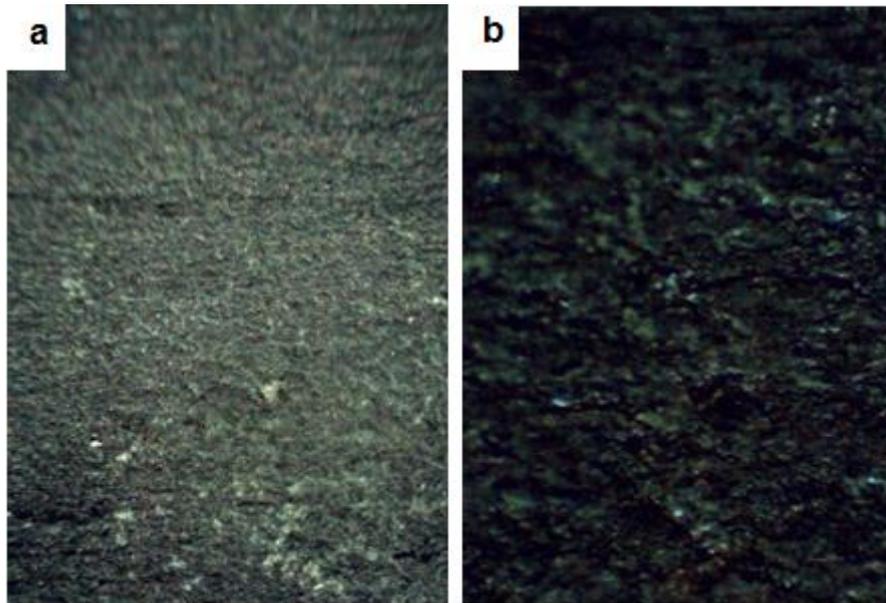


Figura 4.19 - Microscopia óptica da amostra do PCC (Rodrigues, 2016), com aumentos de (a)10x e (b)45x.

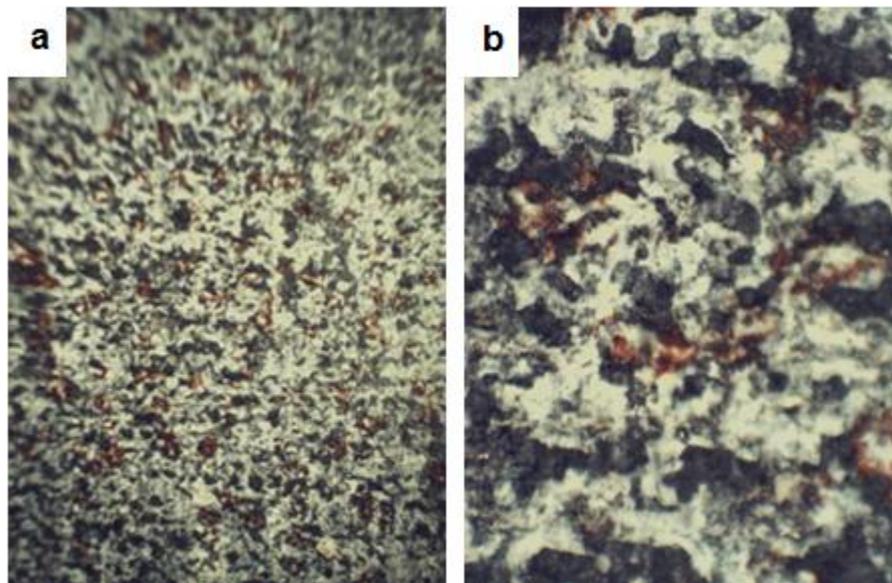


Figura 4.20 - Microscopia óptica da amostra do PCSA, com aumentos de (a)10x e (b)45x.

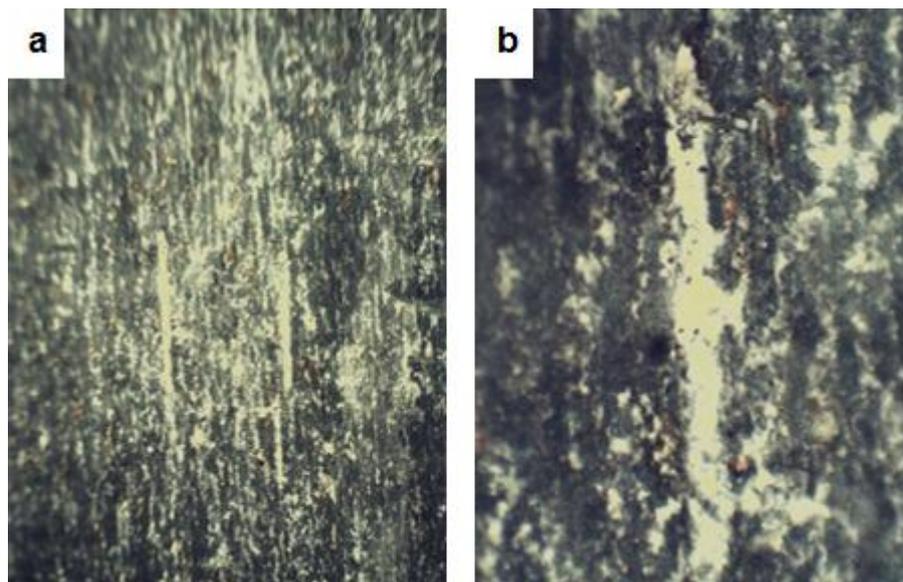


Figura 4.21 - Microscopia óptica da amostra do PCEX, com aumentos de (a)10x e (b)45x.

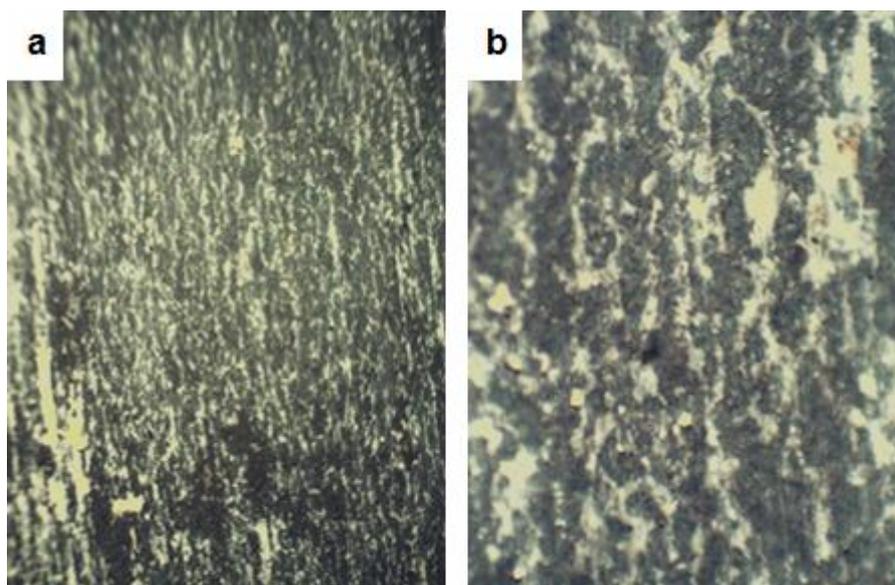


Figura 4.22 - Microscopia óptica da amostra do PCLAS, com aumentos de (a)10x e (b)45x.

4.4.4 Resistência à compressão com carga aplicada ao núcleo de concreto

Analisando os valores expostos na Figura 4.23a e comparando-os com os resultados de resistência à compressão dos concretos (Figura 4.23b), constata-se que as variações de concreto leve ao serem utilizadas como núcleos de preenchimento de seções mistas, apresentaram expressivo acréscimo de resistência ocasionado pelo efeito de confinamento do tubo de aço. O concreto de referência CSA obteve um

aumento de 84% em sua resistência mecânica, ao passo que os concretos com aditivos expensor e LAS obtiveram acréscimos de 92% e 166%, respectivamente. De acordo com Oliveira (2008), Simões (2008), Sakino *et al.*, (2004), Johansson & Åkesson (2001), o efeito de confinamento observado em pilares mistos preenchidos, possibilita o aumento da coesão entre as partículas do concreto e, portanto, aumento da sua capacidade resistente.

Os elevados ganhos de resistência dos núcleos de concreto CEX e CLAS estão relacionados com o melhor desempenho verificado nos protótipos com essas variações de preenchimento. Como constatado nos testes de cisalhamento, a melhora significativa da adesão aço-concreto proporcionado pelo concreto expansivo, e o menor módulo de elasticidade do CLAS são fatores que contribuíram para o aumento do efeito estudado.

Analisando o diagrama Força versus Deformação ϵ_1 dos protótipos ensaiados (Figura 4.24), observa-se que o PCSA apresentou um comportamento bastante distinto dos demais. Até a deformação de 160 m/m, a deformação aumentou com o acréscimo da força de compressão de uma forma aproximadamente linear. No entanto, a partir do momento em que a força aproximada de 160 kN é atingida, observa-se que houve uma perturbação desse diagrama caracterizada por um acentuado acréscimo da deformação com pouco incremento de carga. Ao atingir a carga de 180 kN, o diagrama voltou a apresentar comportamento aproximadamente linear, no entanto com uma mudança de inclinação. Esse desempenho pode ser explicado pelo fato de que, até a perturbação observada, a transferência de carga do núcleo de concreto para o tubo de aço se deu por aderência química. O início da perturbação está relacionado ao momento em que a adesão é rompida, o que de acordo com os testes de cisalhamento ocorreu ao ser atingida a carga de 160 kN. Nessa fase, o núcleo de concreto passa a assumir maior parcela de esforço, e, dessa forma, esse núcleo de preenchimento tende a se deformar, microfissurar e expandir rapidamente, a ponto de solicitar o perfil de aço, possibilitando a manifestação da aderência mecânica e o aumento do efeito de confinamento. A partir desse momento, esses mecanismos permitem que o aço volte a trabalhar em conjunto com o concreto, justificando o comportamento final aproximadamente linear do diagrama.

Por outro lado, observa-se que os protótipos PCLAS e PCEX apresentaram desempenhos semelhantes. Durante todo o ensaio, pode-se verificar que a deformação aumentou com o acréscimo da força de compressão, em um comportamento aproximadamente linear. Dessa forma, constata-se que a melhora significativa da adesão devido ao confinamento proporcionado pelo concreto expensor desde os primeiros dias de cura, e o maior grau de confinamento verificado no protótipo com preenchimento CLAS, fortaleceram o vínculo na interface aço-concreto dos perfis mistos contribuindo para a transferência de tensões de cisalhamento e compatibilidade de deformações entre os materiais da seção.

Na Figura 4.25, que exibe o diagrama Força versus Deformação ϵ_2 dos protótipos ensaiados, pode-se notar comportamentos semelhantes aos analisados na Figura 4.24. As seções PCLAS e PCEX apresentaram desempenhos aproximadamente lineares durante todo o ensaio. Por outro lado, a curva que descreve o comportamento do protótipo PCSA possui perturbação e mudança de inclinação quando atingida a força de compressão aproximada de 160 kN, devido a perda de adesão aço-concreto nesse estágio.

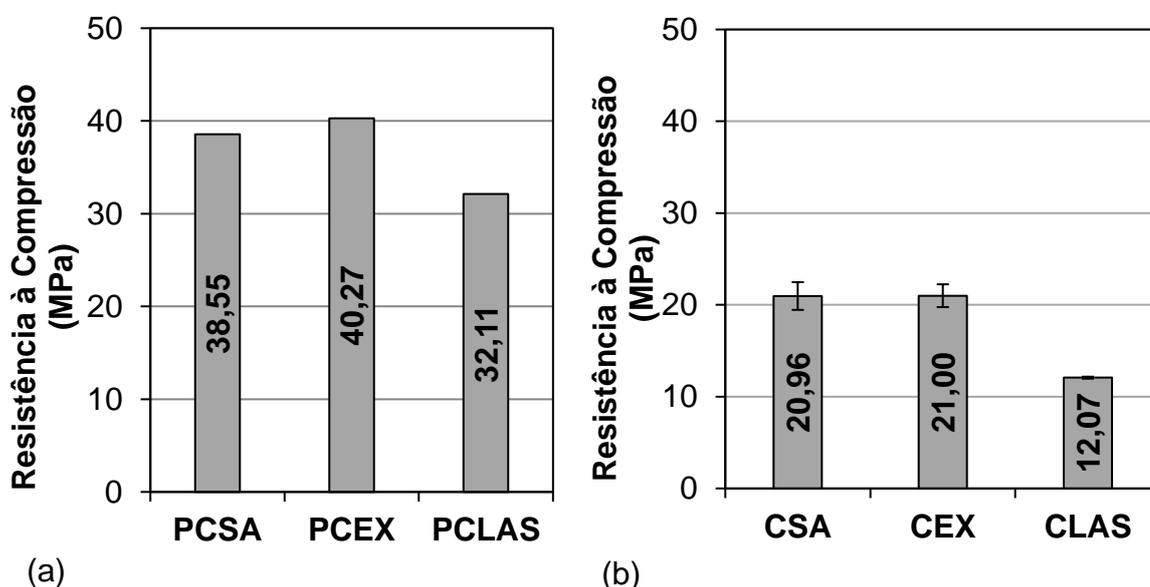


Figura 4.23 - Resistência à compressão: a) dos núcleos de concreto de preenchimento dos protótipos mistos; b) dos concretos leve.

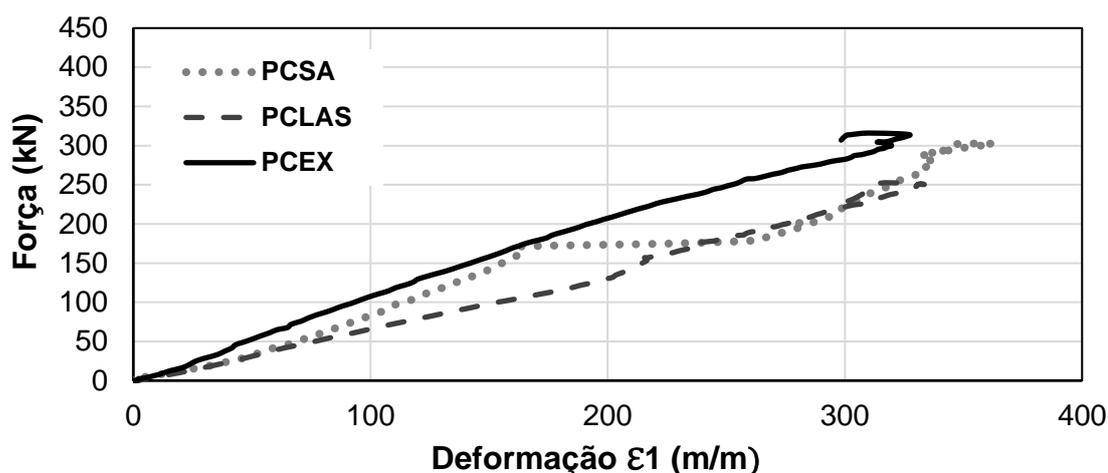


Figura 4.24 - Diagrama força x deformação ϵ_1 dos protótipos mistos.

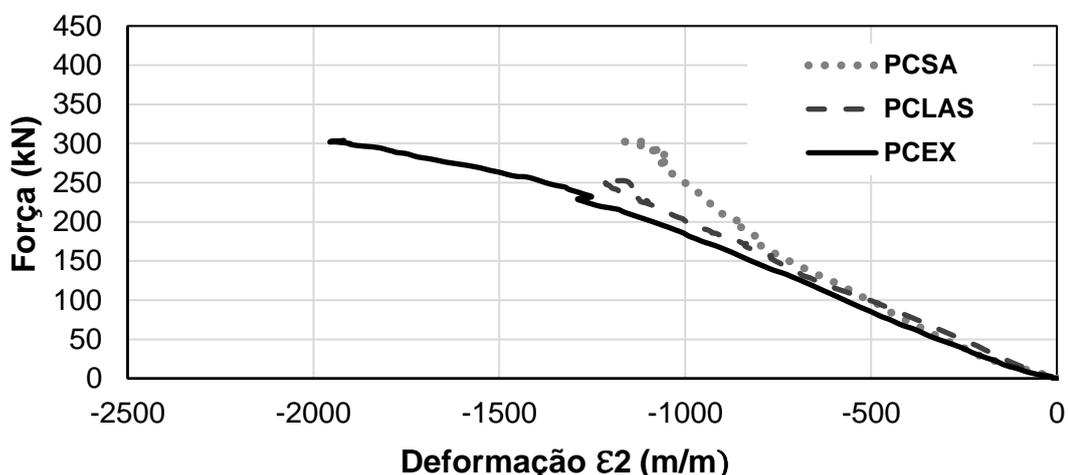


Figura 4.25 - Diagrama força x deformação ϵ_2 dos protótipos mistos.

4.4.5 Resistência à compressão com carga aplicada à seção mista

Analisando os valores expostos na Figura 4.26a e comparando-os com os resultados de resistência à compressão dos concretos (Figura 4.26b), constata-se que embora os concretos CSA e CEX apresentem praticamente os mesmos valores de resistência à compressão (diferença de 0,2%), o protótipo misto PCEX exibiu capacidade resistente 8,12% superior ao do modelo de referência PCSA. Verifica-se também, que o CLAS (com resistência de 42% inferior à identificada para o CSA) conferiu à seção mista PCLAS capacidade resistente muito próxima a do protótipo de referência. Esses desempenhos estão relacionados com os maiores graus de confinamento verificados nas seções preenchidas com CEX e CLAS, como indica os valores de índice de força (SI) apresentados na Tabela 4.4. Esse índice é uma medida

muito útil para a avaliação do efeito de confinamento e tem sido amplamente usada por vários pesquisadores, destacando-se Ekmekyapar & Alleliw (2016), Ding *et al.* (2015), Han *et al.* (2005).

Os índices calculados para os perfis preenchidos com CEX e CLAS foram de 1,41 e 1,63, respectivamente. Segundo Ekmekyapar & Alleliw (2016), índices maiores que 1,35 significam que um bom efeito de confinamento foi verificado, influenciando no aumento da capacidade resistente da seção. Por outro lado, o protótipo com concreto sem adição obteve um SI de 1,31, o que indica que esta configuração teve um desempenho ao confinamento inferior aos demais. Os maiores índices calculados para o PCEX e PCLAS confirmam os resultados encontrados nos ensaios anteriormente descritos.

Considerando o aço de baixa liga SAE 1020 com tensão de escoamento (σ_y) mínima de 210 MPa e módulo de elasticidade (E) de 200 GPa, tem-se que a deformação nominal de escoamento dos tubos, considerando a equação $\varepsilon = \sigma_y / E$, equivale a 1050 m/m. Analisando o diagrama Força versus Deformação ε_2 (Figura 4.28), observa-se que todos os protótipos mistos atingem deformações superiores a 1050 m/m (deformação de escoamento identificada no diagrama por uma reta). As seções PCLAS e PCEX atingiram a deformação nominal de escoamento com cargas aproximadas de 180 kN e 200 kN respectivamente, ao passo que o PCSA alcançou tal deformação com uma carga axial equivalente a 240 kN.

Analisando o diagrama Força versus Deformação ε_1 dos protótipos ensaiados (Figura 4.27), pode-se observar que todas as curvas exibidas apresentaram mudanças de inclinações com específicos níveis de carregamento, devido a diversos fenômenos aço-concreto que aconteceram nas seções mistas, tais como perda de aderência, aumento e/ou diminuição do efeito de confinamento, escoamento do tubo de aço, microfissuração dos núcleos de concreto, dentre outras. A perturbação mais acentuada foi verificada para a curva PCEX. Para essa seção, nota-se que até a deformação de 230 m/m, a deformação aumentou com o acréscimo da força de compressão de forma aproximadamente linear. Alcançada a carga de 200 kN, houve mudança de inclinação da curva e um posterior patamar indicando aumento da deformação com reduzido acréscimo de carregamento. Atingida a carga de 250 kN, o diagrama voltou a apresentar um comportamento aproximadamente linear.

Esse desempenho pode ser explicado pelo fato de que, até a perturbação observada, a transferência de tensões ocorria de forma prevista entre o núcleo de concreto e o perfil de aço. No entanto, por volta da força de 200 kN houve escoamento do tubo de aço, como constatado anteriormente, o que resultou em redução de sua capacidade resistente e consequente sobrecarga do núcleo de concreto expandido. Todavia, esse concreto já estava sob um elevado estado de tensões, anterior à aplicação de carga, ocasionado pelo efeito de confinamento das paredes do tubo. O aumento desse estado de tensões, devido à sobrecarga axial, provocou um processo de microfissuração mais precoce desse núcleo, comparado aos demais protótipos. Contudo, o aumento da deformação do núcleo microfissurado e consequente expansão possibilitaram que o concreto de preenchimento solicitasse o tubo de aço com maior intensidade permitindo o aumento do efeito de confinamento. A partir desse momento, esses mecanismos contribuíram para o aumento da capacidade de carga da seção, justificando o segundo trecho aproximadamente linear da curva.

O comportamento dos protótipos PCSA e PCLAS foi bastante similar. Os estágios de mudanças de inclinações das curvas ocorreram com menores perturbações, uma vez que os núcleos não se encontravam pré-tensionados.

O mecanismo de falha típico de todos os tubos de aço dos protótipos mistos ensaiados foi a plastificação, como se observa na Figura 4.29.

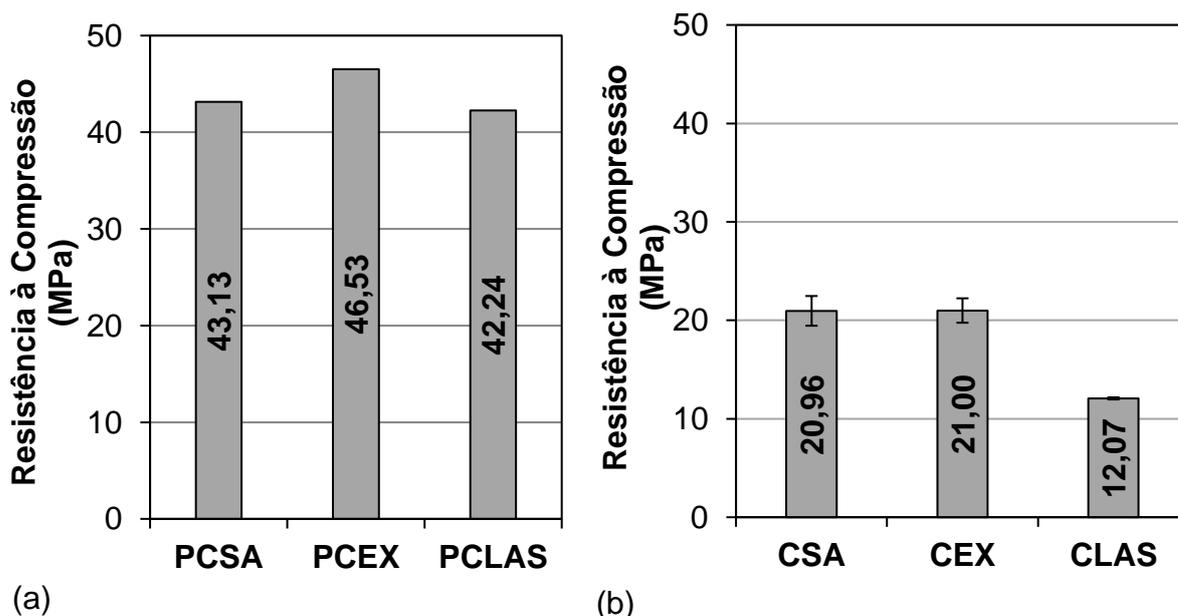


Figura 4.26 - Resistência à compressão: a) das seções mistas; b) dos concretos leves.

Tabela 4.4 - Propriedades das seções mistas.

Protótipo	A_s (mm ²)	A_c (mm ²)	f_y (MPa)	f_{ck} (MPa)	N_u (kN)	SI*
PCSA	615,75	7238,22	210	20,96	338,72	1,31
PCEX	615,75	7238,22	210	21,00	365,42	1,41
PCLAS	615,75	7238,22	210	12,07	331,72	1,63

* Refere-se ao índice de força (SI) dos protótipos mistos calculados de acordo com a equação 4.1:

$$SI = \frac{N_u}{A_s f_y + 0,85 A_c f_{ck}} \quad (4.1)$$

Na expressão:

- N_u é a resistência à compressão da seção mista (N);
- A_s é a área da seção transversal de aço (mm²);
- f_y é a tensão de escoamento do aço (MPa);
- A_c é a área da seção transversal do concreto (mm²);
- f_{ck} é a resistência à compressão do concreto (MPa).

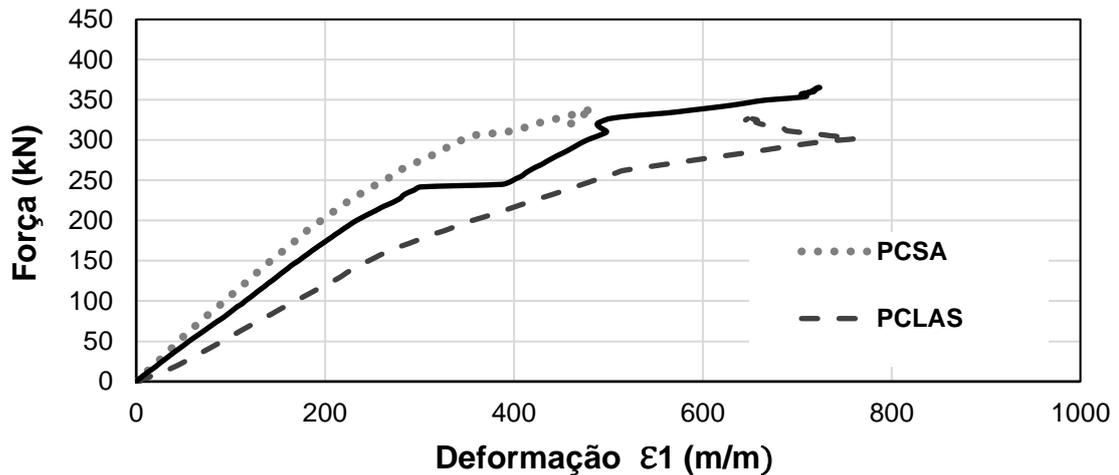


Figura 4.27 - Diagrama força x deformação ϵ_1 dos protótipos mistos.

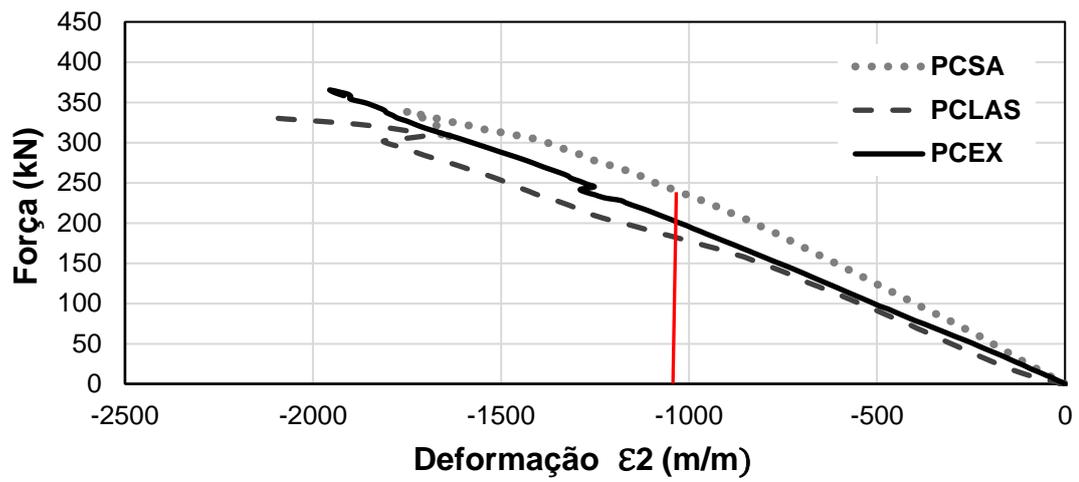


Figura 4.28 - Diagrama força x deformação ϵ_2 dos protótipos mistos.



Figura 4.29 - Modo de falha dos tubos de aço.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos concretos leves no estado endurecido, foi possível verificar que os concretos expansivos apresentaram vazios derivados da incorporação de pequenas bolhas de ar pelo aditivo expensor. No entanto, esses microporos não provocaram redução da resistência mecânica, da massa específica e do módulo de elasticidade estático do material com relação ao concreto de referência. De acordo com a análise térmica procedida, verificou-se que o teor de cálcio presente nessa matriz foi consideravelmente menor que para os demais tratamentos, podendo-se inferir que esse elemento tenha se recombinado com demais elementos, formando produtos de hidratação os quais contribuíram para a resistência mecânica e massa específica compensando a perda esperada pelo aumento da porosidade.

A introdução de ar ao concreto, a partir da utilização de LAS, reduziu consideravelmente a resistência mecânica e a massa específica da matriz devido ao aumento do índice de vazios. Além disso, a elevada porosidade propiciou redução do módulo de elasticidade estático do concreto com incorporador de ar alternativo, implicando em maior deformabilidade do material ao ser solicitado axialmente.

A partir das investigações experimentais com os protótipos mistos, pode-se verificar que o concreto leve de preenchimento proporciona melhor desempenho da seção mista quanto à aderência e ao efeito de confinamento, com relação ao concreto convencional. Isto deve-se ao menor módulo de elasticidade do concreto leve, que propicia maior deformação radial desse núcleo de preenchimento quando submetido à compressão, gerando maior resistência na interface aço-concreto.

Quanto aos protótipos preenchidos com concreto expansivo pode-se observar que a expansão gerada por esse tipo de concreto durante o seu período de endurecimento induz um efeito de confinamento nas paredes do tubo de aço, proporcionando melhora da adesão na interface e excelente desempenho dos protótipos quando submetidos a cargas axiais.

Em relação aos perfis preenchidos com concreto com LAS, pode-se verificar forte manifestação da aderência mecânica e por atrito. As predominâncias desses mecanismos de aderência estão relacionadas com as irregularidades superficiais e

com o menor módulo de elasticidade do material de preenchimento. O efeito de confinamento foi bastante pronunciado nesses protótipos a ponto de compensar a reduzida resistência desse concreto e contribuir para uma maior força de ligação na interface.

Dessa forma, pode-se verificar que o aditivo expansor do tipo sulfoaluminato de cálcio e o incorporador de ar baseado em LAS, contribuíram para um bom desempenho dos núcleos de preenchimento proporcionando maior compatibilização entre os materiais da seção mista. No entanto, os protótipos com LAS, mesmo tendo apresentado o maior índice de confinamento e grande manifestação da aderência mecânica e por atrito, obtiveram resistências inferiores aos demais modelos, pelo fato de o incorporador de ar reduzir a capacidade de carga do núcleo de concreto.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos em perfis semelhantes ao proposto por este trabalho com a utilização de conectores de cisalhamento, objetivando-se melhorar a aderência e a compatibilização entre os elementos da seção mista. Sugere-se também ensaios em protótipos compostos por tubos com diferentes relações largura/espessura a fim de verificar a influência da rigidez do tubo na aderência da interface e no efeito de confinamento. Recomenda-se ainda, o estudo de concretos produzidos com resíduos, como exemplo a escória de aciaria, empregados como preenchimento de seções mistas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Guide for structural lightweight aggregate concrete, **ACI 213R-03**. ACIA Manual of Concrete Practice, 2003.
- ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Campinas, 2014.
- ARAUJO, C. M. S. **Estudo da transferência de forças na ligação entre pilares mistos preenchidos e vigas**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- ASSI, I. M.; QUDEIMAT, E. M.; HUNAITI, Y. **Ultimate moment capacity of foamed and lightweight aggregate concrete-filled steel tubes**. Steel and Composite Structures, v.3, n.3, p.199-212, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório – procedimento. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 35** - Agregados leves para concreto estrutural. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5736**: Cimento portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Concreto – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802**: Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67**: Ensaio de abatimento do concreto (slump test). Rio de Janeiro, 1998.

AGUIAR, E. C. C.; SILVÉRIO, C. D. V.; PEREIRA, L. A.; KANNING, R. C. CEFET-PR – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – **A tecnologia do concreto aliada ao meio ambiente**, <http://www.cefetpr.br/deptos/dacoc/isopet/>, 2004.

BREMNER, T. W. **Concreto de Agregado Leve**. Revista Técnica, Issue 37, 1998.

CARBALLOSA, P.; CALVO, J. L. G.; REVUELTA, D.; SÁNCHEZ, J. J.; GUTIÉRREZ, J. P. **Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-compacting concretes for structural elements**. Construction and Building Materials, v.93, p.223-229, 2015.

CATOIA, T. **Concreto Ultraleve estrutural com pérolas de EPS: caracterização e estudo de suas aplicações em lajes**. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F. **Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato**. In: 47 Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa, 2007.

CHEN, X. & ZHOU, J. **Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar**. Construction and Building Materials, v.40, p.869-874, 2013.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. 2ª ed, vol. 1. Lisboa: LNEC, 1988.

DEFÁVARI, K. C. S. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lã de rocha, fibra de vidro e lã de vidro**. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

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

DE NARDIN, S., EL DEBS, A.L.H.C. **Axial load behaviour of concrete-filled steel tubular columns**. Structures and Buildings, v. 160, p. 13-22, 2007.

DILLI, M. E.; ATAHAN, H. N.; SENGUL, C. **A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates**. Construction and building materials, v. 101, p.260-267, 2015.

DING, F. X.; LIU, J.; LIU, X. M.; YU, Z. W.; LI, D. W. **Mechanical behavior of circular and square concrete filled steel tube stub columns under local compression**. Thin Walled Structures, v.94, p.155–166, 2015.

DU, L. & FOLLIARD, K. J. **Mechanisms of air entrainment in concrete**. Cement and Concrete Research, v. 33, p. 1463-1471, 2005.

EKMEKYAPAR, T.; AL-ELIWI, B. J. M. **Experimental behavior of circular concrete filled steel tube columns and design specifications**. Journal of Constructional Steel Research, v.105, p. 220-230, 2016.

FUJIMOTO, T.; MUKAI, K.; NISHIYAMA, I.; SAKINO, K. **Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns**. Journal of Structural Engineering. ASCE/FEBRUARY, v.130, n.2, p.203-212, 2004.

GAO, C. Y.; LI, B. **Experimental research on seismic behavior of lightweight aggregate concrete-filled steel tubular frame**. Advanced Materials Research, v. 163-167, p. 2194-2198, 2011.

GHANNAM, S.; JAWAD, Y. A.; HUNAITI, Y. **Failure of lightweight aggregate concrete-filled steel tubular columns**. Steel Composite Structures, v.4, n.1, p.1-8, 2004.

GIAKOUMELIS, G; LAM, D. **Axial capacity of circular concrete-filled tube columns**. Journal of Constructional Steel Research, v.60, n.7, p.1044-1068, 2004.

HAN, L. H.; LI, W.; BJORHOVDE, R. **Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CSFT) structures: members**. Journal of Constructional Steel Research, v.100, p.211-228, 2014.

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

HU, H.; HUANG, C.; WU, M. **Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect**. Journal of Structural Engineering, v.129, n.10, p. 1322-1329, 2003.

ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

JOHANSSON, M. **Composite action in connection regions of concrete-filled steel tube columns**. Steel and Composites Structures, v.3, n.1, 2003.

JOHANSSON, M. **The efficiency of passive confinement in CFT columns.** Steel and Composite Structures, v.2, n.5, p.379-396, 2002.

JOHANSSON, M.; ÅKESSON, M. **Finite element study on concrete filled steel tubes using a new confinement sensitive concrete compression model.** Nordic Concrete Research, v.2/2001, n.27, p.43-62, 2002.

JOHANSSON, M.; GYLLTOFT, K. **Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns.** Journal of Structural Engineering, v.128, n.8, p.1073-1080, 2002.

KAI-CHENG, X.; MENG-CHENG, C.; FANG, Y. **Confined expansion and bond property of micro-expansive concrete-filled steel tube columns.** The Open Civil Engineering Journal, v.5, p.173-178, 2011.

KE, Y.; ORTOLA, S.; BEAUCOUR, A. L.; DUMONTET, H. **Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ).** Cement and Concrete Research, v.40, p.1590-1600, 2010.

KONIK, Z.; MALOLEPSZY, J.; ROSZCZYNIANSKI, W.; STOK, A. **Production of expansive additive to Portland cement.** Journal of the European Ceramic Society, v.27, p.605-609, 2007.

LEA, F. **The Chemistry of Cement and Concrete.** Nova York: Chemical Publishing Company, 1971.

LEONHARDT, R.; MONNIG, E. **Construções de concreto: Casos especiais de dimensionamento de estruturas de concreto armado.** 2^a ed. São Paulo: Interciência, 1979.

LIEW, J. Y. R.; XIONG, M.; XIONG, D. **Design of concrete filled tubular beam-columns with high strength steel and concrete.** Structures, v.8, p.213-226, 2016.

MEHTA, P. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2^a ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas de cimento de escória ativada.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

MENDES, J. C.; MORO, T. K.; FIGUEIREDO, A. S.; DEFÁVERI, K. C. S.; SILVA, G. C.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. A. F. **Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS – based air entraining agent.** Construction and Building Materials, v.145, p.648-661, 2017.

MONTEIRO, P. J. M. **Caracterização da microestrutura do concreto. Fases e interfaces – aspectos de durabilidade e de microfissuração.** Tese (livre docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.

MORIOKA, M.; SAKAI, E.; DAIMON, M. **Influence of Preparation Method on Performance of Expansive Additive Containing free – lime, Hauyne and Anhydrite.** Concrete Research and Technology, v.14, n.2, p.43-50, 2003a.

MOULI, M. et al. **Use of Structural Lightweight Aggregate Concrete: Illustrated by Examples.** Argelia: ENSET Oran, 2004.

MOULI, M.; KHELAFI, H. **Strength of short composite rectangular hollow section columns filled with lightweight aggregate concrete**. Engineering Structures, v.29, n.8, p.1791-1797, 2007.

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.

OLIVEIRA, W. L. A.; DE NARDIN, S.; EL DEBS, A. L. H. C. **Dimensionamento de pilares preenchidos de seção circular submetidos à compressão simples, segundo a NBR 8800:2008 e Eurocode 4:2004: comparação com resultados experimentais**. Revista Escola de Minas, v.62, n.1, p.73-85, 2009.

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.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MATA, L. A. C. **Elemento das estruturas mistas aço-concreto**. Belo Horizonte: Editora O Lutador, 2001. 336p.

QUÍMICA AMPARO LTDA. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos - FISPQ - Detergente Ypê Neutro**, http://www.ype.ind.br/wp-content/uploads/2014/08/FISPQ_LAVALOUCAS, 2011.

RAMACHANDRAM, V. S.; PAROLI, R. M.; BEAUDOIN, J. J.; DELGADO, A.H. **Thermal Analysis of Construction Materials**. 1ª ed. Nova York: Noyes Publications, 2002.

RODRIGUES, B. H. **Estudo da aderência ao aço dos concretos convencional, leve e com ar incorporado em seções mistas de perfis tubulares**. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

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.

ROMANO, R. C. O. **Produção e caracterização de materiais porosos obtidos pelo método de incorporação de espumas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A. & AGNESINI, M. V. C. **Concreto Leve Estrutural**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. Tese de Doutorado, Interunidades EESC/IFSC/IQSC, Universidade Federal de São Paulo, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: PINI, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. **Concreto Leve Estrutural**. In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005a.

SACHS, A. **Calor sob controle**. Revista Técnica, Issue 190, 2012.

SAE, 1992. J1397: **Estimated Mechanical Properties and Machinability of Steel Bars**, Warrendale: SAE, 1992.

- SAE, 2012. AMS5046D: **Carbon Steel, Sheet, Strip, and Plate, (SAE 1020 and 1025)**, Annealed, Warrendale: SAE.
- SAKINO, K., NAKAHARA, H., MORINO, S., NISHIYAMA, A. **Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns**. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.130, n.2, p.180-188, 2004.
- SALAGER, J. L. **Surfactantes – Typos y usos**. Cuaderno FIRP, S300A, p.1-54, Universidad de los Andes, 2002.
- SANTOS, A. M.; CABRAL, L. M. C.; MONTEIRO, E. B.; HELENE, P. R. L. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto**. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto, Gramado – RS, 2013.
- SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª ed, vol. 1 e 2. São Paulo: Edgard Blucher: 1992.
- SHANMUGAM, N. E.; LAKSHMI, B. **State of the art report on steel-concrete composite columns**. Journal of Constructional Steel Research, v.57, n.10, p.1041-1080, 2001.
- SHORT, A.; KINNIBURGH, W. **Lightweight concrete**. 1ª ed. London: CR books limited, 1963.
- 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.
- SIMÕES, R. **Efeito do confinamento em pilares mistos curtos de aço e concreto**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, 2008.
- SOARES, A. F. F. **Software especialista para dosagem de misturas cimentícias**. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2009.
- SOUZA, B. P. **Aderência de barras de aço tipo CA em concreto sustentável**. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.
- TAO, Z.; SONG, T.; UY, B.; HAN, L. **Bond behavior in concrete-filled steel tubes**. Journal of Constructional Steel Research, v.120, p.81-93, 2016.
- TORRES, A. F. & ROSMAN, C. E. **Método para dosagem racional do concreto**. São Paulo: ABCP, 1956.
- TORRES, D. R.; FUJII, A. L.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G. **Impacto da rota de incorporação de ar nas propriedades de materiais formulados com cimento Portland**. Ambiente Construído, v.14, n.2, p.141-152, 2014.
- 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, 1980.
- XIE, Y.; CORR, D. O.; JIN, F.; ZHOU, H.; SHAH, S. P. **Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete**. Cement & Concrete Composites, v.55, p.223-231, 2015.

XU, C.; CHENGKUI, H.; DECHENG, J.; YUANCHENG, S. **Push-out test of pre-stressing concrete filled circular steel tube columns by means of expansive cement.** Construction and Building Materials, v.23, p.491-497, 2009.

YIN, J.; ZHA, X.; LI, L. **Fire resistance of axially loaded concrete filled steel tube columns.** Journal of Constructional Steel Research, v.62, n.7, p.723-729, 2006.

ZEGHICHE, J. & CHAOUI, K. **An experimental behaviour of concrete-filled steel tubular columns.** Journal of Constructional Steel Research, v.63, n.1, p.53-66, 2005.

ZHANG, M. H.; GJΦRV, O. E. **Microstructure of the interfacial zone between lightweight concrete and cement paste.** Cement and Concrete Research, v.20, n.4, p.610-618, 1990.