



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 Construção Metálica

Mestrado Profissional em Construção Metálica - MECOM



ESCOLA DE MINAS

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA UTILIZAÇÃO DE CONCRETO ENSACADO COMO REFORÇO EM PERFIS TUBULARES DE AÇO

Ouro Preto
2019



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 Construção Metálica

Mestrado Profissional em Construção Metálica - MECOM



ESCOLA DE MINAS

Matheus de Souza e Silva

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA UTILIZAÇÃO DE CONCRETO ENSACADO COMO REFORÇO EM PERFIS TUBULARES DE AÇO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Construção Metálica.

Orientador: Prof. Flávio Teixeira de Souza, D.Sc.
Coorientadora: Prof^a Arlene Maria Cunha Sarmanho, D.Sc.

Ouro Preto
2019

S586a

Silva, Matheus de Souza.

Análise experimental da utilização de concreto ensacado como reforço em perfis tubulares de aço [manuscrito] / Matheus de Souza Silva. - 2019.

63f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Teixeira Souza.

Coorientadora: Profa. Dra. Arlene, Maria Cunha Sarmanho.

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

Área de Concentração: Construção Metálica.

I. Concreto Ensacado. 2. Perfil Tubular. 3. Estrutura Mista. I. Souza, Flávio Teixeira. II. Sarmanho, Arlene, Maria Cunha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.014



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções
Mestrado Profissional em Construção Metálica



ANÁLISE EXPERIMENTAL DA UTILIZAÇÃO DE CONCRETO ENSACADO COMO REFORÇO EM PERFIS TUBULARES DE AÇO

AUTOR: MATHEUS DE SOUZA E SILVA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em quatorze de março de 2019, pela Comissão Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG (Presidente)

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

Prof. Vinícius Nicchio Alves, D. Sc. – UFOP

Prof. Gabriel Vieira Nunes, D. Sc. – IFMG

Prof. Mário Luís Cabello Russo, D. Sc. – IFMG

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1.	OBJETIVOS	16
1.1.1.	Objetivo geral	16
1.1.2.	Objetivo específico	16
1.2.	JUSTIFICATIVA	16
1.3.	METODOLOGIA	17
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.	O AÇO	18
2.2.	O CONCRETO ENSACADO	18
2.3.	ESTRUTURAS MISTAS	19
2.4.	PILARES MISTOS	19
2.5.	ADERÊNCIA EM PILARES MISTOS	20
2.6.	CONFINAMENTO EM PILARES MISTOS	21
2.6.1.	Influência do confinamento	23
2.7.	COMPRESSÃO EM PILARES MISTOS	23
2.7.1.	Flambagem local dos elementos de aço	24
2.7.2.	Índice de esbeltez do pilar misto	24
2.7.3.	Contribuição do confinamento para a resistência	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1.	MATERIAIS	26
3.1.1.	O concreto	27
3.2.	MÉTODOS	28
3.2.1.	Confecção dos corpos de prova de concreto	28
3.2.2.	Ensaio de caracterização do aço	29
3.2.3.	Corpos de prova mistos	29
4	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	32
4.1.	DOSAGEM DO CONCRETO	32
4.2.	CARACTERIZAÇÃO DO AÇO	33
4.3.	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO DO CONCRETO ENSACADO	34

5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
5.1.	TUBOS SEM PREENCHIMENTO DE CONCRETO (TUBO)	36
5.2.	TUBOS COM PREENCHIMENTO DE CONCRETO SEM CONECTORES (SCON)	37
5.3.	TUBOS COM PREENCHIMENTO DE CONCRETO COM CONECTORES (4CON)	39
5.4.	TUBOS COM PREENCHIMENTO DE CONCRETO COM CONECTORES (6CON)	40
5.5.	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO	42
5.6.	ANÁLISE DA COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	43
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICE A	50
	APÊNDICE B.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de pilares mistos aço-concreto	20
Figura 2.2: Exemplos de pilares mistos	20
Figura 2.3: Transferência de aderência natural	21
Figura 2.4: Tensões no núcleo de concreto e no tubo metálico.....	22
Figura 2.5: Tensões de confinamento em seções circulares	22
Figura 2.6: Tensões de confinamento em seções retangulares e quadradas	23
Figura 3.1: Tubo SAE 1020.....	26
Figura 3.2: Concreto ensacado com embalagem reduzida na horizontal	27
Figura 3.3: Tanque de cura	28
Figura 3.4: Prensa hidráulica	29
Figura 3.5: Corpo de prova	30
Figura 3.6: Corpos de prova preenchidos	31
Figura 3.7: Aplicação de carga	31
Figura 4.1: Slump Test	33
Figura 4.2: Corpo de prova da pesquisa	34
Figura 5.1: Ensaio compressão corpo de prova grupo TUBO.....	37
Figura 5.2: Corpos de prova grupo TUBO	37
Figura 5.3: Ensaio compressão corpo de prova grupo SCON.....	38
Figura 5.4: Corpos de prova grupo SCON	39
Figura 5.5: Ensaio compressão corpo de prova grupo 4CON	40
Figura 5.6: Corpos de prova grupo 4CON	40
Figura 5.7: Ensaio compressão corpo de prova grupo 6CON	41
Figura 5.8: Corpos de prova grupo 6CON	42
Figura 7.1: Agitador mecânico agregado miúdo	51
Figura 7.2: Agitador mecânico agregado graúdo	53
Figura 7.3: Frasco Chapman.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Relação de trabalhabilidade e abatimento do concreto	33
Tabela 4.2: Resultados do ensaio de caracterização do aço	34
Tabela 4.3: Resultados do ensaio de compressão do concreto do concreto ensacado.....	35
Tabela 5.1: Resultados protótipos sem preenchimento (grupo TUBO)	36
Tabela 5.2: Resultados protótipos preenchidos (grupo SCON)	38
Tabela 5.3: Resultados protótipos preenchidos (grupo 4CON).....	39
Tabela 5.4: Resultados protótipos preenchidos (grupo 6CON).....	41
Tabela 5.5: Resultados dos índices de força.....	42
Tabela 5.6: Resultados dos fatores de contribuição	43
Tabela 5.7: Esforço normal resistente característico NBR 8800 e NBR 16239.....	43
Tabela 5.8: Esforço normal resistente característico EC-4 sem confinamento	44
Tabela 5.9: Esforço normal resistente característico EC-4 com confinamento.....	44
Tabela 5.10: Parcelas das resistências	44
Tabela 7.1: Ensaio granulométrico do agregado miúdo (amostra 1).....	51
Tabela 7.2: Ensaio granulométrico do agregado miúdo (amostra 2).....	52
Tabela 7.3: Ensaio granulométrico do agregado miúdo (amostra 3).....	52
Tabela 7.4: Ensaio granulométrico do agregado graúdo (amostra 1).....	53
Tabela 7.5: Ensaio granulométrico do agregado graúdo (amostra 2).....	54
Tabela 7.6: Ensaio de massa específica.....	54
Tabela 7.7: Ensaio de massa unitária do agregado miúdo.....	56
Tabela 7.8: Ensaio de massa unitária do agregado graúdo.....	56
Tabela 7.9: Ensaio de massa unitária compactada do agregado graúdo.....	57
Tabela 7.10: Abatimento slump test.....	58
Tabela 7.11: Determinação do consumo de agregado graúdo.....	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 7.1: Relação água/cimento e resistência a compressão	58
--	----

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

A/c – gua/cimento

A_a – rea da seção transversal do perfil de aço

A_c – rea da seção transversal do concreto

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A_s – rea da seção transversal da armadura

Ca – Consumo de gua

Cc – Consumo de cimento

cm² – Centímetro quadrado

cm³ – Centímetro cúbico

CPII – Cimento portland composto classe 2

D – Diâmetro externo do perfil de aço

d – Diâmetro interno do perfil de aço

dm³ – Decmetro cúbico

E_a – Módulo de elasticidade do aço

E_c – Módulo de elasticidade do concreto

E_s – Módulo de elasticidade da armadura

$(EI)_e$ – Rigidez efetiva  flexão

f_{cj} – Resistência do concreto  compressão, prevista para a idade de j dias

f_{ck} – Resistência característica do concreto a compressão

f_{sd} – Resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura

f_y – Resistência ao escoamento do aço

f_{yd} – Resistência de cálculo ao escoamento do aço

g – Grama

I_a – Momento de inércia da seção do aço

I_c – Momento de inércia da seção do concreto

I_s – Momento de inércia da seção da armadura

K – Coeficiente de flambagem de barras comprimidas

kg – Quilograma

L – Comprimento

m³ – Metro Cúbico

mm – Milímetro

N_e – Força axial de flambagem elástica

$N_{pl,Rd}$ – Força axial resistente de cálculo da seção transversal do pilar misto à plastificação total

$N_{pl,Rk}$ – Força axial resistente característica da seção transversal do pilar misto à plastificação total

N_u – Resistência a compressão da seção mista

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

MPa – Mega Pascal

SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto

SAE – Society Automotive Engineers (SAE)

S_d – Desvio padrão da dosagem em função do controle da obra

SI – Índice de força

t – Espessura do perfil de aço

α_c – Coeficiente relacionado à curva de dimensionamento à compressão

λ – Índice de esbeltez

δ – Fator de contribuição do aço

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem ele nada seria possível. Obrigado senhor pela força que me destes para caminhar nesse difícil desafio. Agradeço porque nunca me deixou faltar nada, mesmo não sendo merecedor. O teu amor abundante e misericordioso sempre esteve ao meu lado, mesmo nas horas de desânimo. “Dêem graças em todas as circunstâncias, pois esta é a vontade de Deus para vocês em Cristo Jesus”. 1º Tessalonicenses 5:18.

Agradeço aos meus alunos Cleiferson, Matheus e Uanderson por juntamente comigo encararem esse desafio de pesquisa. Desde já o meu muito obrigado.

Agradeço a Faculdade do Futuro de Manhuaçu – MG que sempre me deu o suporte para realização da pesquisa, assim como, permitiu a utilização do seu espaço físico. Agradeço em especial ao coordenador do curso de engenharia civil Carlos Augusto, pelo incentivo e compreensão de sempre.

Agradeço minha mãe Rute Silva de Souza e pai Teodolino de Sousa e Silva. Em especial minha MÃE, mesmo possuindo uma condição de vida simples, nunca me permitiu desistir dos estudos, nem quando tudo parecia tão distante. Mesmo com dificuldades sempre fez de tudo para que eu estivesse em uma boa escola. Obrigado por terem acreditado que um dia chegaria aqui, sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço ao meu enteado Thayron, a minha filha Luiza e esposa Claudia. Em especial, agradeço a Luiza e Claudia, por tudo o que fizeram por mim. Em muitas vezes viajaram comigo para Ouro Preto, mesmo sendo algo cansativo, para que pudéssemos sempre estar próximos. Quero que saibam o quanto vocês são importantes para mim e o quanto significam nessa caminhada. EU AMO VOCÊS.

Agradeço a Universidade Federal de Ouro Preto, pela oportunidade de cursar um Mestrado tão importante e significativo para o meu desenvolvimento profissional. Agradeço em especial aos meus orientadores, professores Dr. Flávio Teixeira de Souza e a professora Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho. O conhecimento de vocês é peça fundamental para o desenvolvimento da pesquisa, obrigado por compartilhar isso comigo.

Agradeço a Doutoranda Ellen Martins Xavier pela realização do ensaio característico do aço utilizado, com supervisão da professora Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho sendo fundamental para a pesquisa.

Agradeço ao meu amigo Dr. Rafael Perígolo pelas dicas e auxílio na dissertação, sua ajuda foi essencial.

A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

Com o crescimento da construção civil, faz-se necessária a elaboração de materiais industrializados, a fim de minimizar os custos e reduzir os desperdícios, aumentando a produtividade e a confiabilidade do produto. O concreto ensacado é uma mistura feita em laboratório, seguindo ensaios rigorosos parametrizados pelas normas da ABNT, gerando um produto de maior confiabilidade. Vem como alternativa para canteiro de obras mais limpo, evitando assim perdas de material, erros no traço, baixa resistência à compressão e os demais problemas enfrentados no concreto moldado “in loco”. O aço vem ganhando espaço no mercado brasileiro devido às inúmeras vantagens apresentadas, tais como a execução rápida, leveza do material e redução de desperdícios. Este trabalho busca associar o concreto ensacado ao aço, tendo o foco em perfil tubular, de modo a verificar o aumento na resistência de um protótipo misto aço/concreto. Para isso foram ensaiados 12 corpos de provas, sendo feita a associação de 9 protótipos constituídos pelo tubo SAE 1020 com 300 mm de comprimento, sendo pilar curto para eliminar a flambagem global, 100 mm de diâmetro e espessura 2 mm associado ao concreto ensacado com resistência mínima de 20 MPa, e 3 protótipos não preenchidos de concreto. Os perfis mistos passaram por ensaio de compressão para avaliar a respectiva resistência, sendo a carga aplicada apenas no aço para todos os corpos de prova. Foram elaborados corpos de prova simples e corpos de prova com parafusos que funcionam como conectores de reforço, para avaliar a influência destes, no comportamento e resistência dos protótipos. Foi observado que os conectores aumentaram a resistência dos protótipos. A comparação entre resultados experimentais e prescrições normativas indicaram que a inclusão dos conectores melhorou a aderência, o que justifica o ganho de resistência do protótipo.

Palavras-chave: Concreto ensacado, Perfil tubular e Estrutura mista.

ABSTRACT

The civil construction evolution demands new industrialized materials in order to minimize costs, reduce waste, increasing productivity and product reliability. The bagged concrete mixture is made in the laboratory and, therefore, the tests follow strict ABNT standards, generating a product of greater reliability. The bagged concrete comes as an alternative to a cleaner construction site, avoiding material losses, concrete mix errors, low compressive strength and other problems encountered in molded concrete “*in loco*”. The steel structural use has been gaining ground in the Brazilian market due to its numerous advantages such as rapid execution, lightness of the material and reduction of the waste. Herein it is discussed the association of bagged concrete with steel, focusing on tubular profiles, in order to verify the increase in strength of a steel / concrete mixed prototype. It was used 12 test specimens, 9 of them – consisted of the SAE 1020 tube 300 mm long, being the short to eliminate global buckling, 100 mm in diameter and 2 mm thick filed with the bagged concrete with a minimum strength of 20 MPa and – and 3 prototypes considering only the tube, not filled with concrete. It was performed a compression test of the mixed prototypes, to evaluate their resistance, applying a load only to the steel in all test bodies. Simple test specimens and test specimens with screws that function as reinforcement connectors were elaborated to evaluate their influence on the behavior and resistance of the prototypes. The connectors increased the prototypes resistance. Comparison between experimental and analytical data indicated that connectors improved adherence, that explains the increasing in resistance.

Keywords: Bagged concrete, Tubular profile, Mixed structure.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A competitividade na construção civil atual exige cada vez mais a utilização de técnicas e materiais eficientes e de baixo custo. Sendo assim, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas, para o surgimento de materiais que possam suprir as necessidades do mercado.

O concreto é um material composto por uma mistura de água, cimento e agregados, sendo o último dividido em agregados miúdos (areias) ou agregados graúdos (pedras britadas). Por ser técnica conhecida, a mão de obra é facilmente encontrada, com uma relação custo benefício satisfatória. É um material com boa resistência à compressão, mas pouca resistência à tração, sendo necessária em muitas vezes sua associação com outros materiais, como o aço. A regulamentação do dimensionamento de estruturas de concreto no Brasil é definida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

O aço é uma liga metálica formada por ferro e carbono, com elevada resistência à tração e à compressão, além de ductilidade. Características como sua tendência à corrosão e baixa resistência a temperaturas em situação de incêndio, além da busca por economia, faz com que o aço, em muitas vezes, seja utilizado de maneira mista, ou seja, associado ao concreto. A regulamentação do dimensionamento de estruturas de aço constituídas de perfis formados a frio é definida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de acordo com a norma NBR 14762 (ABNT, 2010).

Segundo Figueiredo (1998), com a função de associar as vantagens referentes à resistência e termos construtivos do aço e concreto, surge a utilização de perfis tubulares mistos desses materiais.

Com isso, esse trabalho irá avaliar o aumento da resistência do aço quando preenchido de concreto e avaliar a variação de resistência quando são utilizados parafusos como conectores com diferentes arranjos. O concreto utilizado para os ensaios será do tipo ensacado, desenvolvido no laboratório da Faculdade do Futuro em Manhuaçu – MG (SILVA *et al.*, 2017), com resistência mínima de 20 MPa, buscando demonstrar a viabilidade da utilização desse material para reforço em regiões críticas de estruturas metálicas, tais como as ligações.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a resistência e o comportamento de tubos aço SAE 1020, preenchidos com concreto ensacado, com e sem conectores de reforço, submetidos à compressão.

Esta avaliação experimental visa analisar e fomentar a utilização desta associação no reforço de estruturas tubulares em suas regiões críticas, tais como as ligações.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar propriedades de interesse do concreto ensacado.
- Determinar a resistência do elemento aço-concreto.
- Avaliar e comparar a resistência da coluna de aço, sem preenchimento de concreto ensacado.
- Avaliar e comparar a resistência do concreto ensacado com o protótipo misto aço-concreto, sem conectores, com carga aplicada apenas no aço.
- Avaliar e comparar a resistência do concreto ensacado com o protótipo misto aço-concreto, com conectores, com carga aplicada apenas no aço.
- Avaliar a influência dos parâmetros do protótipo por meio de comparação com prescrições normativas.
- Comparar os resultados experimentais com parâmetros normativos.

1.2. Justificativa

O concreto e o aço possuem de maneira individual características importantes e quando associados, transformam-se em um sistema estrutural viável.

O aço em muitas vezes não é utilizado como único sistema estrutural devido ao seu preço elevado, se comparado ao concreto, além de sua fragilidade à corrosão e temperaturas elevadas, em casos de incêndio, podendo chegar ao colapso estrutural.

A esbeltez local D/t (relação entre o diâmetro do tubo e a espessura da parede) e a esbeltez global L/D (relação entre o comprimento do tubo e o diâmetro) influênciam tanto na capacidade resistente, quanto no efeito de confinamento do pilar, por torná-lo mais

suscetível a flambagem. Nas estruturas esbeltas, em muitas vezes o perfil tubular, sendo de pequena espessura, tende ao colapso por rasgamento ou esmagamento na região da ligação viga-pilar. Com o protótipo será avaliado o aumento da resistência do aço, tornando-se uma alternativa de reforço.

1.3 Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos nesse trabalho será adotada a seguinte metodologia:

- Revisão bibliográfica sobre pilares mistos preenchidos de concreto.
- Ensaios em laboratório para avaliar a resistência a compressão dos corpos de prova feitos de concreto ensacado.
- Análise dos resultados obtidos nos ensaios a compressão, da associação do concreto ensacado em perfis tubulares de aço SAE 1020 com 100 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.
- Avaliação do aumento da resistência à compressão do tubo de aço, quando preenchido de concreto e analisar a interferência dos conectores de reforço no protótipo.
- Avaliação do modelo por meio de prescrições normativas para analisar seu comportamento considerando as diversas variáveis envolvidas.

1.4 Estrutura do trabalho

O capítulo 2 traz a revisão bibliográfica sobre o tema da pesquisa.

O capítulo 3 refere-se aos materiais e métodos usados durante os ensaios, assim como a dinâmica dos estudos em laboratório.

No capítulo 4 são descritas as caracterizações dos materiais (concreto ensacado e perfil tubular de aço).

O capítulo 5 aborda os resultados e discussões dos dados obtidos nos ensaios de compressão do protótipo misto e a comparação com prescrições normativas.

O capítulo 6 apresenta as considerações finais e propostas de trabalhos futuros para a pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados conceitos para o entendimento da pesquisa, bem como características e aplicações do aço, concreto ensacado e estruturas mistas. É feita uma revisão sobre o comportamento das ligações, demonstrando a necessidade das estruturas de reforço.

2.1 O aço

Segundo Pfeil e Pfeil (2008), com o aumento da produção e necessidade de processos construtivos mais ágeis, o aço começou a ser utilizado em grande escala a partir da década de 1950, e sua utilização para fins estruturais é crescente, demandando o desenvolvimento de pesquisas para acrescer sua utilização.

Segundo Rodrigues (2016), a construção em aço está presente em shoppings, pontes, viadutos e edifícios, sendo aplicado em construções de pequeno, médio e grande porte. Tendo como principal vantagem a rapidez de execução, além de boa resistência à tração e compressão, possibilitando vencer grandes vãos.

2.2 O concreto ensacado

Quando dosado em obras, o concreto pode ter sua qualidade comprometida por erros de precisão nas medidas das quantidades de seus insumos, bem como falta de equipamentos adequados para a mistura. Com isso, fatores como a resistência mecânica e a trabalhabilidade do concreto podem ficar comprometidos.

O concreto ensacado, como sua nomenclatura define, é produzido em sacos plásticos, onde a água é adicionada através de uma válvula, evitando assim, possíveis desperdícios. Desenvolvido no laboratório de engenharia da Faculdade do Futuro em Manhuaçu – MG por Silva *et al.* (2017) em embalagens de 25 kg, é submetido a ensaios, da caracterização dos elementos à ruptura dos corpos de prova, todos amparados pelas respectivas normas específicas, para garantir sua qualidade.

Segundo Silva *et al.* (2017), para funcionar adequadamente o concreto precisa ser feito com materiais livres de impurezas, possuindo caracterizações em ensaios específicos, assim como uma relação água/cimento e pasta/agregados bem definida.

2.3 Estruturas mistas

Com o desenvolvimento dos sistemas estruturais, surgiram, entre outros, sistemas constituídos por elementos mistos aço-concreto, onde a combinação de perfis de aço e concreto tem como objetivo aproveitar as vantagens de cada material, no que se refere à estrutura e elementos construtivos (BERGMANN ET AL, 1995).

Segundo Chaves (2009), quando se trata de perfis de aço formados a frio, a utilização de sistema misto ainda está em fase inicial, necessitando de amplos estudos a respeito. Entretanto, no Brasil, tem se estimulado o emprego de estrutura mista com perfis formados a frio devido à ampla disponibilidade de aço.

Em perfis tubulares preenchidos de concreto o aço trabalha restringindo a expansão lateral do núcleo de concreto, dando origem ao confinamento. O confinamento pode ser de dois tipos: passivo e ativo. O ativo é definido como um estado de tensões que é aplicado lateralmente e controlado externamente, onde pressões são aplicadas nas laterais de um cilindro de concreto e mantidas constantes durante a aplicação de força axial. Já no confinamento passivo impede a expansão lateral do elemento, quando este é solicitado por força axial (OLIVEIRA, 2008).

Segundo Fadini (2017) a interação entre aço-concreto é fundamental para que um elemento misto desempenhe corretamente sua função. Dessa forma, dois aspectos importantes em um sistema misto são a aderência e o efeito do confinamento do concreto.

2.4 Pilares mistos

Segundo Ribeiro Neto (2016), o uso dos pilares mistos busca aproveitar as características de cada material, tendo como vantagens a redução no tempo de construção, aumento de área útil nos pavimentos (causada pela redução de seção nos perfis), além de aumentar sua resistência contra o fogo. Ainda segundo Ribeiro Neto (2016), o perfil tubular preenchido de concreto aumenta a resistência do núcleo em função do estado triaxial de tensões, além de dificultar a flambagem local no tubo de aço, ou seja, trata-se de uma vantagem mútua. Esse aumento de resistência será avaliado no presente trabalho.

A motivação inicial que impulsionou os primeiros pilares mistos foi a ideia de protegê-los contra incêndio e corrosão (NARDIN, 1999). Atualmente existem diversos

pilares mistos, variando a nomenclatura de acordo com a posição em que o concreto ocupa em sua seção transversal, como mostram as Figuras 2.1 e 2.2.

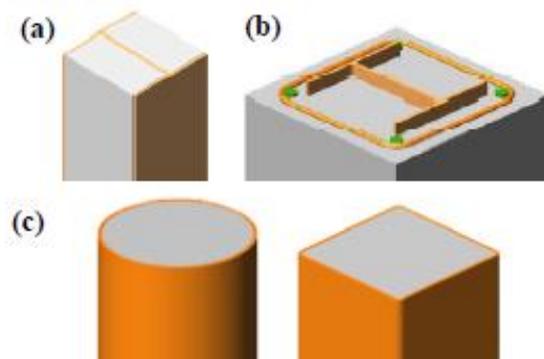


Figura 2.1 – Tipos de pilares mistos aço-concreto. (a) Perfil I de aço revestido parcialmente por concreto, (b) perfil I totalmente revestido por concreto, (c) perfil tubular de aço de diferentes seções transversais, preenchido de concreto (OLIVEIRA, 2008).

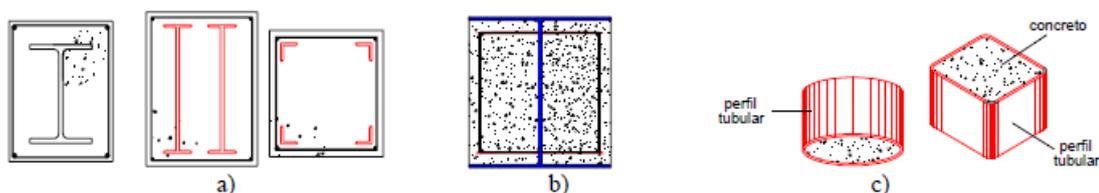


Figura 2.2 – Exemplos de pilares: a) revestidos; b) parcialmente revestidos e c) preenchidos (NARDIN *et al.*,1999).

2.5 Aderência em pilares mistos

Segundo Da Silva (2006) com a aplicação da carga no concreto há o escorregamento do mesmo, e esse fato é analisado para avaliar a transferência de cisalhamento na interface aço-concreto nos pilares mistos.

Para Oliveira (2008) a aderência natural pode ser subdividida em três: adesão, aderência mecânica e atrito, como mostrado na Figura 2.3, podendo ser utilizados dispositivos para aumentar a resistência ao deslizamento, conhecidos como conectores de cisalhamento.

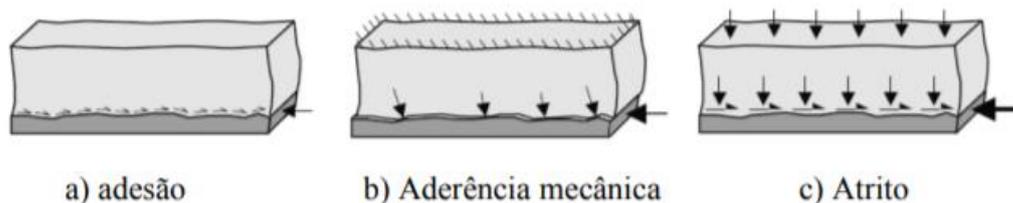


Figura 2.3 – Transferência de aderência natural (JOHANSSON & GYLLTOFT, 2002).

Segundo Da Silva (2006) a aderência por adesão está relacionada a aderência química entre o tubo de aço e o concreto, tendo sua manifestação no início do carregamento, podendo ser desprezada para efeito de resistência. A aderência mecânica tem valor importante enquanto as superfícies estão em contato. Ela se encerra no estágio inicial do carregamento, devido ao aumento relativo do deslocamento do aço em relação ao concreto. Para Araújo (2009) o adensamento do concreto tem grande influência na aderência mecânica.

Já a aderência por atrito depende da força normal aplicada na interface, juntamente com o coeficiente de atrito da superfície, coeficiente este que está relacionado a rugosidade interna do tubo, variando de 0,0 a 0,6 (DA SILVA, 2006).

2.6 Confinamento em pilares mistos

Segundo Oliveira et al. (2009) um dos fatores de maior relevância nos pilares mistos preenchidos a ser avaliado é o efeito do confinamento, caracterizado pela restrição pelo tubo de aço a expansão do núcleo de concreto.

Para Johansson & Åkesson (2002) o confinamento de um pilar misto preenchido de concreto divide-se em três fases: no estágio inicial o perfil tubular não exerce efeito de confinamento no núcleo de concreto, devido a diferença do coeficiente de Poisson do aço para o concreto. Quando a carga aplicada atinge um valor próximo da resistência uniaxial do concreto ocorre um forte processo de microfissuração e expansão, causando o confinamento. Nessa fase o concreto fica submetido a um estado triaxial de tensões, causado pela compressão axial e pressão lateral combinadas. Dessa forma a resistência do conjunto, torna-se superior a resistência do tubo, acrescida da resistência do concreto, demonstrada pela Figura 2.4.

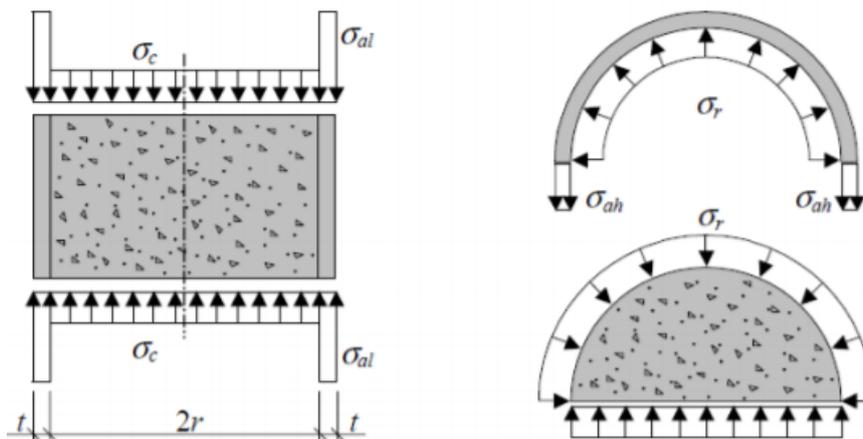


Figura 2.4 – Tensões no núcleo de concreto e no tubo metálico (Johansson & Åkesson, 2002).

Para Nardini (1999) o acréscimo na resistência causada pelo confinamento do concreto depende de diversos fatores: espessura do perfil, índice de esbeltez do pilar misto, excentricidade da força, resistência dos materiais e forma da seção transversal. Todos os fatores juntos contribuirão para um maior ou menor efeito de confinamento do concreto.

Na seção circular todo o concreto está sujeito ao mesmo grau de confinamento, diferentemente das seções quadradas e retangulares, como mostrado na Figura 2.5 e Figura 2.6.

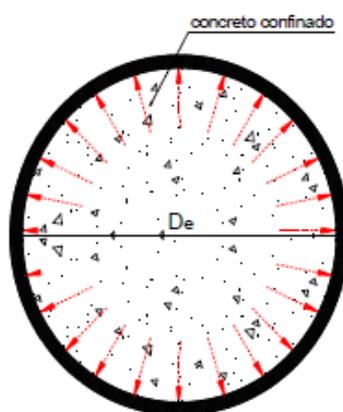


Figura 2.5 – Tensões de confinamento em seções circulares. Fonte: (NARDINI 1999).

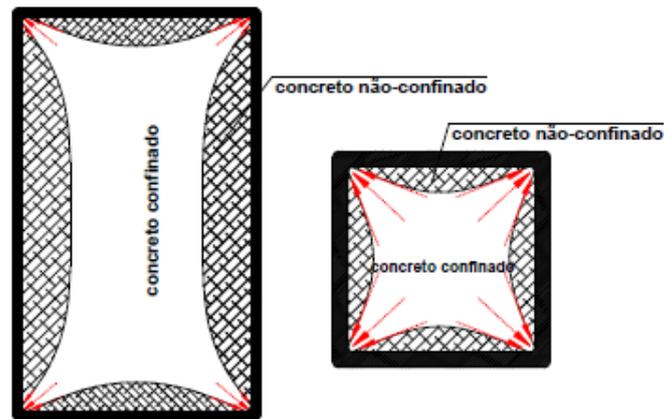


Figura 2.6 – Tensões de confinamento em seções retangulares e quadradas. Fonte: (NARDINI 1999).

2.6.1 Influência do confinamento

Segundo Ekmekyapar & Alleliw (2016), índices de força (SI) maiores que 1,35 significam que um bom efeito de confinamento foi verificado, influenciando no aumento da capacidade resistente da seção, podendo ser calculado por:

$$SI = \frac{N_u}{A_s f_y + 0,85 A_c f_{ck}} \quad \text{Equação 2.1}$$

2.7 Compressão em pilares mistos

Segundo as normas NBR 8800 (ABNT, 2008), NBR 16239 (ABNT, 2013) e Eurocode [4] (2004), o dimensionamento de uma coluna mista deve atender uma condição relativa à contribuição da seção de aço para resistência total da coluna mista.

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad \text{Equação 2.2}$$

Para garantir o funcionamento da estrutura misto aço e concreto o fator de contribuição deve obedecer à relação $0,2 \leq \delta \leq 0,9$. Sendo A_a a área da seção transversal do perfil de aço e f_{yd} a resistência de escoamento do aço.

Segundo Azevedo, Lima e Vellasco (2016) o esforço axial de compressão resistente de cálculo no que tange à plastificação total da seção mista $N_{pl,Rd}$ é dado pela soma das forças axiais resistente de cálculos dos componentes, sendo eles o perfil de aço, concreto e armadura, quando for o caso.

$$N_{pl,Rd} = (A_a \times f_{yd}) + (A_c \times f_{cd} \times \alpha_c) + (A_s \times f_{sd}) \quad \text{Equação 2.3}$$

Sendo que o α_c é um coeficiente referente a tensão do concreto, sendo para NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 16239 (ABNT, 2013) 0,95 para seções circulares mistas de aço preenchidas de concreto. Já para o Eurocode [4] (2004) este coeficiente vale 1,0.

2.7.1 Flambagem local dos elementos de aço

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 16239 (ABNT, 2013) considera que a resistência de todos elementos (perfil de aço, núcleo de concreto e armaduras) seja atingida sem que ocorra flambagem local dos elementos. Para isso, a relação proposta na Equação 2.4 deve ser obedecida.

$$\lambda_{\text{máx}} = \left(\frac{D}{t}\right)_{\text{máx}} \leq 0,15 \frac{E}{f_y} \quad \text{Equação 2.4}$$

Para o Eurocode [4] (2004) a flambagem local pode ser ignorada desde que a relação demonstrada na Equação 2.5 seja seguida.

$$\lambda_{\text{máx}} = \left(\frac{D}{t}\right)_{\text{máx}} = \frac{21150}{f_y} \quad \text{Equação 2.5}$$

2.7.2 Índice de esbeltez do pilar misto

Para a NBR 8800 (ABNT,2008) o índice de esbeltez é calculado em função da força de resistência dos materiais pela força axial de flambagem elástica N_e , mostrado na Equação 2.6 e 2.7. Sendo o índice de esbeltez relativo do pilar misto não pode ser maior do que 2,0.

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{N_e}} \quad \text{Equação 2.6}$$

$$N_e = \frac{\Pi^2(EI)_e}{(KL)^2} \quad \text{Equação 2.7}$$

Para o Eurocode [4] (2004) a rigidez efetiva à flexão $(EI)_e$ é calculada de acordo com a Equação 2.8 onde K_e tem seu valor recomendável de 0,6.

$$(EI)_e = E_a I_a + K_e E_c I_c + E_s I_s \quad \text{Equação 2.8}$$

2.7.3 Contribuição do confinamento para resistência

Segundo Azevedo, Lima e Vellasco (2016) para casos de pilares mistos tubulares preenchidos de concreto o Eurocode [4] (2004) avalia a influência do confinamento no aumento da resistência, podendo causar um ganho. A resistência plástica à compressão deve ser calculada de acordo com a equação abaixo:

$$N_{pl,Rd} = (\eta_a \cdot A_a \cdot f_{yd}) + A_c \cdot f_{cd} \cdot \left(1 + \eta_c \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}}\right) + A_s \cdot f_{sd} \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde t representa a espessura da parede do tubo da seção de aço e η_a e η_c obedecem o seguinte:

- Para elementos de excentricidade zero, os valores de $\eta_a = \eta_{a0}$ e $\eta_c = \eta_{c0}$ são dados pela equação:

$$\eta_{a0} = 0,25 (3 + 2\lambda) \text{ mas } \eta_{a0} \leq 1,0 \quad \text{Equação 2.10}$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5\lambda + 17\lambda^2 \text{ mas } \eta_{c0} \geq 0 \quad \text{Equação 2.11}$$

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados materiais e métodos utilizados no preparo do concreto ensacado, bem como dos tubos utilizados na confecção dos pilares mistos, para análise da sua resistência em ensaios experimentais. Para isso são apresentadas propriedades de cada material utilizado e técnicas utilizadas para elaboração dos protótipos de interesse.

Os protótipos são divididos em quatro grupos, sendo o primeiro grupo somente o tubo, o segundo grupo preenchido de concreto e o terceiro e quarto grupo utilizando parafusos sextavados simples de rosca completa como reforço.

3.1 Materiais

O tubo de aço utilizado para o desenvolvimento do protótipo é formado a frio, com costura, constituído pelo aço SAE 1020. O comprimento do tubo foi estabelecido com o objetivo de eliminar a ocorrência da flambagem global (NBR 8800:2008), respeitando também a limitação de altura do equipamento em que serão realizados os ensaios de resistência a compressão. As dimensões do tubo foram às mesmas em todos os protótipos elaborados e estão apresentados na Figura 3.1.

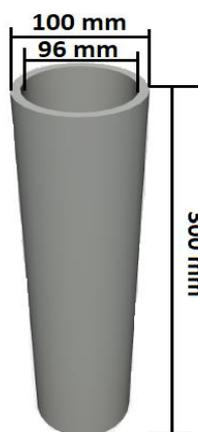


Figura 3.1 – Tubo SAE 1020.

Fonte: Autor.

Na pesquisa foi utilizado o cimento Portland CII 32 para a dosagem do concreto ensacado. Os agregados usados no concreto ensacado foram areia grossa e brita 1 provenientes da região de Manhuaçu – MG.

A água utilizada na mistura do concreto é potável, ou seja, considerada livre de qualquer impureza, fornecida pela rede de abastecimento SAAE da cidade de Manhuaçu - MG.

3.1.1 O concreto

Para o preenchimento dos tubos de aço foi usado o concreto ensacado, desenvolvido por Silva *et al.* (2017), no laboratório de engenharia civil da Faculdade do Futuro. Foram feitos os ensaios granulométricos dos agregados de acordo com suas respectivas normas, obtendo um traço final 1 : 2 : 3 : 0,58.

Após 24 horas do material em estufa de secagem foi realizada a retirada para o resfriamento, passando pelo processo de pesagem e mistura com betoneira, sendo finalizado pela embalagem do produto.

A embalagem é feita de material plástico transparente, capaz de armazenar o concreto e receber a devida quantidade de água, através da válvula na parte superior, que é aberta quando o saco encontra-se na posição vertical e fechada quando na horizontal. O concreto é fornecido em sacos, como mostrado na Figura 3.2, com capacidade de 25 kg, possuindo resistência mínima de 20 MPa.



Figura 3.2 – Concreto ensacado com embalagem reduzida de amostra (2 kg), (a) na posição horizontal, com válvula de adição de água fechada; (b) na posição vertical, demonstrando a válvula de adição de água aberta.

Fonte: Autor.

3.2. Métodos

3.2.1. Confeção dos corpos de prova de concreto

Foram elaborados 12 corpos de prova para a determinação da resistência característica à compressão do concreto ensacado. Para a cura dos corpos de prova utilizou-se o método de imersão, os corpos de prova foram retirados dos moldes e colocados em um tanque até a data de ruptura, conforme mostra a Figura 3.3.



Figura 3.3 – Tanque de cura.

Fonte: Autor.

Para os ensaios de ruptura dos corpos de prova foi utilizada uma prensa hidráulica elétrica da marca Contenco mostrada na Figura 3.4, do modelo I-3025-B com a capacidade de aplicação de carga de 100 toneladas (1 MN). A aplicação da carga ocorre de forma contínua sobre o corpo de prova, de modo a permitir o ensaio do módulo de elasticidade e resistência característica do concreto a compressão.



Figura 3.4 – Prensa hidráulica.

Fonte: Autor

3.2.2. Ensaio de caracterização do aço

Foram retirados corpos de prova dos tubos utilizados nos ensaios, e foram submetidos ao ensaio de tração para a determinação de suas propriedades elastoplásticas, conforme previsto na norma NBR 6152 (ABNT, 2002).

3.2.3 Corpos de prova mistos

Foram realizados ensaios de compressão em protótipos de aço e mistos. Foram ensaiados quatro grupos de corpos de prova, com o objetivo de observar a influência do preenchimento de concreto no seu comportamento.

- Grupo TUBO - três protótipos tubulares sem o preenchimento de concreto;
- Grupo SCON - três protótipos tubulares com o preenchimento de concreto, deixando-se 5 mm livres entre a borda do tubo e o preenchimento de concreto, em ambas as extremidades, sem a utilização de conectores entre o aço e o concreto;
- Grupo 4CON –três protótipos tubulares com preenchimento similar ao grupo SCON, com a utilização de quatro conectores entre o aço e o concreto, dois na parte superior e dois na inferior.
- Grupo 6CON –três protótipos tubulares com preenchimento similar ao grupo SCON, com a utilização de seis conectores entre o aço e o concreto, três na parte superior e três na inferior.

A Figura 3.5 apresenta os protótipos ensaiados anteriormente à concretagem.



Figura 3.5 – Corpos de Prova Grupo TUBO, SCON, 4CON e 6CON.

Fonte: Autor

Como conectores foram usados parafusos de diâmetro 6,3 mm ($\frac{1}{4}$ "), com porca, sendo inseridos no tubo a um espaçamento a partir da borda representada pela equação 3.1

Equação 3.1

$$e = 1,65d = 11 \text{ mm}$$

$$11 \text{ mm} + 5 \text{ mm (borda livre)} = 16 \text{ mm}$$

Os tubos foram preenchidos, como mostra a Figura 3.6, e no 28º dia forma submetidos ao ensaio de compressão. A aplicação de carga em todos os protótipos foi exclusivamente no perfil tubular, como demonstrado na Figura 3.7.



Figura 3.6 – Corpos de prova preenchidos Grupo SCON, 4CON e 6CON.

Fonte: Autor

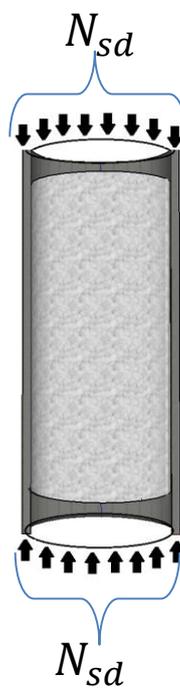


Figura 3.7 – Aplicação de Carga.

Fonte: Autor

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo são descritas as técnicas de caracterização dos agregados usados no concreto ensacado e parâmetros de sua dosagem, além da caracterização do tubo de aço, usado nos protótipos tubulares mistos.

4.1. Dosagem do concreto

Foram realizados diversos ensaios necessários para garantir a qualidade do concreto ensacado, seguindo a NBR 5738 (ABNT, 2003) como:

- Ensaio granulométrico do agregado seguindo a NBR 7211 (ABNT, 2009).
- Ensaio de massa específica seguindo a NBR 9776 (ABNT, 2003).
- Ensaio de massa unitária seguindo a NBR 7251 (ABNT, 1982).
- Ensaio abatimento do tronco de cone seguindo a NM 67 (ABNT, 1998).

Com a realização dos ensaios característicos citados anteriormente foram obtidos os seguintes dados:

- Dimensão máxima característica agregado miúdo = 2,4 mm.
- Módulo de finura = 2,49.
- Dimensão máxima característica agregado graúdo = 25 mm.
- Massa específica = 2,74 kg/m³.
- Massa unitária = 1,535 kg/dm³.
- Relação água/cimento = 0,58.
- Consumo de cimento = 344,83 kg.
- Consumo agregado graúdo = 1.128,2 kg.
- Consumo agregado miúdo = 674,90 kg.
- Traço = 1 : 2 : 3 : 0,58.

Estando todos os cálculos detalhados no APÊNDICE A, no final desta dissertação.

A trabalhabilidade do concreto foi verificada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test), seguindo as recomendações da NBR NM 67/1998, conforme mostra a Figura 4.1.



Figura 4.1 – Slump test.

Fonte: Autor.

Neville (1997) apresenta a relação do abatimento do concreto com sua trabalhabilidade, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Relação de trabalhabilidade e abatimento do concreto

Trabalhabilidade abatimento (mm)	Abatimento (mm)
Abatimento zero	0
Muita baixa	5 a 10
Baixa	15 a 30
Media	15 a 75
Alta	80 a 155
Muito alta	160 ao desmoronamento

Fonte: Neville (1997).

O concreto desenvolvido teve abatimento de 100 mm, possuindo, segundo a tabela, alta trabalhabilidade, o que é adequado ao preenchimento dos tubos de aço.

4.2. Caracterização do aço

O aço utilizado na pesquisa (SAE 1020) foi caracterizado no laboratório de estruturas Professor Altamiro Tibiriçá Dias da Universidade Federal de Ouro Preto, de acordo com a norma NBR 6152 (ABNT, 2002). A Figura 4.2 apresenta as dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de tração e os resultados para a tensão de escoamento e tensão última são apresentados na Tabela 4.2.

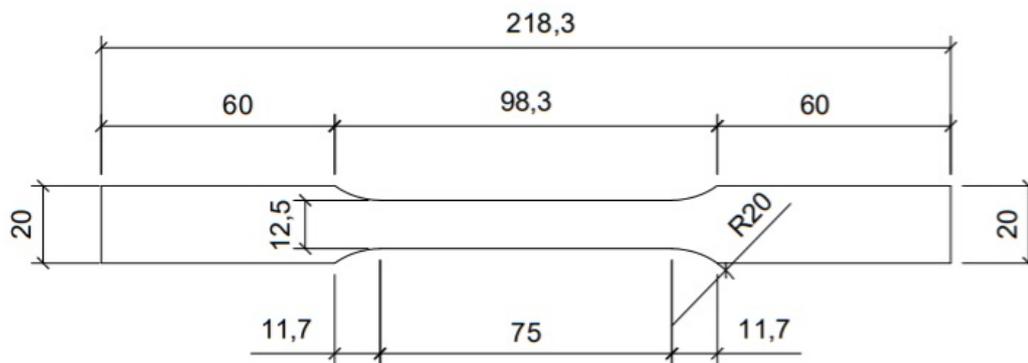


Figura 4.2 – Corpo de prova da pesquisa

Fonte: Autor.

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de caracterização do aço.

Corpo de Prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Última (MPa)	Deformação
CP 1	341,41	420,90	0,29
CP 2	332,80	418,83	0,44
CP 3	309,97	398,95	0,39
Média	328,06	412,89	0,37

Fonte: Autor.

4.3. Determinação da resistência característica à compressão do concreto ensacado

Foram confeccionados 12 corpos de prova para o ensaio de compressão do concreto ensacado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo a ruptura no 7°, 14°, 21° e 28° dia. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Resultados do ensaio de compressão do concreto ensacado

Tabela de teste de ruptura				
Tempo	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	CP 3 (MPa)	Média
7 dias	12,10	12,20	11,50	11,93
14 dias	16,60	17,30	16,85	16,92
21 dias	18,60	19,10	18,55	18,75
28 dias	21,20	21,60	22,60	21,80

Fonte: Autor

Pode-se observar que, na idade de 28 dias, todos os corpos de superam a expectativa de 20 MPa, mostrando a eficiência do controle de qualidade aplicado ao concreto ensacado e indicando sua adequação para o uso estrutural proposto neste trabalho.

CAPÍTULO 5**APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compressão dos protótipos compostos por perfis tubulares associados ao concreto ensacado. A nomenclatura adotada é apresentada no item 3.2.3. Todos os protótipos foram ensaiados no vigésimo oitavo dia após a concretagem.

5.1. Tubos sem preenchimento de concreto (TUBO)

A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos para os protótipos sem preenchimento. Estes resultados são importantes para a avaliação da influência do reforço no comportamento e na resistência do tubo.

Tabelas 5.1 – Resultados protótipos sem preenchimento (grupo TUBO)

Nome	Carga (kN)
TUBO1	192,80
TUBO2	189,27
TUBO3	184,86

Fonte: Autor

A Figura 5.1 apresenta o corpo de prova no ensaio de compressão, e a Figura 5.2 os corpos de prova após o ensaio. Pode-se observar grandes deslocamentos em todos os corpos de prova, indicando o escoamento do aço nos protótipos sem preenchimento.



Figura 5.1 – Ensaio compressão corpo de prova grupo TUBO

Fonte: Autor.



Figura 5.2: Corpos de prova Grupo TUBO

Fonte: Autor.

5.2. Tubos com preenchimento de concreto sem conectores (SCON)

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos para os protótipos com preenchimento sem conectores. Estes resultados são importantes para avaliar a mudança no comportamento dos protótipos preenchidos de concreto.

Tabela 5.2: Resultados protótipos preenchidos (grupo SCON)

Nome	Carga (kN)
SCON1	209,47
SCON2	190,15
SCON3	211,63

Fonte: Autor.

A Figura 5.3 apresenta o corpo de prova no ensaio de compressão, e a Figura 5.4 mostra os corpos de prova após o ensaio, evidenciando o fenômeno de transmissão de carga. Pode-se observar um aumento na resistência se comparado ao grupo TUBO de 7,82%. Observam-se ainda deslocamentos similares aos observados no grupo sem preenchimento, porém nas duas extremidades do tubo, fenômeno conhecido como “pata de elefante”.



Figura 5.3 – Ensaio compressão corpo de prova grupo SCON

Fonte: Autor.



Figura 5.4 – Corpos de prova grupo SCON

Fonte: Autor.

5.3. Tubos com preenchimento de concreto com conectores (4CON)

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos para os protótipos preenchidos de concreto e com quatro conectores (4CON). Estes resultados são importantes para avaliar a mudança no comportamento dos protótipos se comparados aos dois primeiros grupos (TUBO e SCON).

Tabelas 5.3 – Resultados protótipos preenchidos e com conectores (grupo 4CON)

Nome	Carga (kN)
4CON1	394,04
4CON2	365,70
4CON3	384,52

Fonte: Autor

A Figura 5.5 apresenta o corpo de prova no ensaio de compressão, e a Figura 5.6 mostra os corpos de prova ensaiados. Pode-se observar um aumento na resistência se comparado aos grupos TUBO de 101,83% e ao grupo SCON de 87,2%. Observam-se ainda deslocamentos diferentes dos grupos anteriores, onde houve concentração nas bordas. Nos protótipos com preenchimento e quatro conectores, ocorrem deslocamentos na região central dos tubos, demonstrando a influência do preenchimento no comportamento e na resistência do protótipo.



Figura 5.5 – Ensaio compressão corpo de prova grupo 4CON

Fonte: Autor.



Figura 5.6 – Corpo de prova grupo 4CON

Fonte: Autor.

5.4. Tubos com preenchimento de concreto com conectores (6CON)

A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos para os protótipos preenchidos de concreto e com seis conectores (6CON). Estes resultados são importantes para avaliar a mudança no comportamento dos protótipos se comparados aos três grupos anteriores (TUBO, SCON e 4CON).

Tabelas 5.4 – Resultados protótipos preenchidos e com conectores (grupo 6CON)

Nome	Carga (kN)
6CON1	465,82
6CON2	456,99
6CON3	462,88

Fonte: Autor

A Figura 5.7 apresenta o corpo de prova no ensaio de compressão e a Figura 5.8 os corpos de prova posteriormente ao ensaio. Pode-se observar um aumento na resistência se comparado aos três primeiros grupos TUBO, SCON e 4CON de 144,42%, 126,70% e 21,10%, respectivamente.

Os deslocamentos observados assemelham-se aos protótipos preenchidos e com quatro conectores, demonstrando a efetividade da associação do aço com o concreto. Ressalta-se que o aumento do número de conectores melhora esta associação.



Figura 5.7 – Ensaio compressão corpo de prova grupo 6CON

Fonte: Autor.



Figura 5.8 – Corpo de prova grupo 6CON

Fonte: Autor

5.5. Análise da influência do confinamento

Com base na Equação 2.1 foram determinados os índices de força para cada corpo de prova, como demonstrado na Tabela 5.5, avaliando o reforço ocorrido, tendo como parâmetro, o índice de força maior ou igual a 1,35.

Tabelas 5.5 – Resultados dos índices de força

Nome	Carga (kN)	Índice de Força (SI)
SCON1	209,47	0,62
SCON2	190,15	0,57
SCON3	211,63	0,63
4CON1	394,04	1,17
4CON2	365,70	1,09
4CON3	384,52	1,14
6CON1	465,82	1,39
6CON2	456,99	1,36
6CON3	462,88	1,38

Fonte: Autor.

Pode-se observar a otimização do reforço devido ao aumento de conectores, tendo um reforço satisfatório o grupo 6CON, pois, com este arranjo de conectores, aplicando-

se a carga no perfil tubular, há transferência de carga dos conectores para o núcleo de concreto, provocando uma melhor aderência do mesmo.

5.6. Análise da compressão dos corpos de prova

Utilizando as Equações 2.2 e 2.3 foram determinados os fatores de contribuição da estrutura mista, além do esforço normal resistente característico pela NBR 8800 (ABNT,2008) e NBR 16239 (ABNT, 2013), demonstrados na Tabela 5.6 e 5.7. O esforço normal resistente característico pelo Eurocode [4] (2004) é demonstrado na Tabela 5.8.

Tabelas 5.6 – Resultados dos fatores de contribuição

Nome	Carga (kN)	Fator de Contribuição (δ)
SCON1	209,47	0,96
SCON2	190,15	1,06
SCON3	211,63	0,95
4CON1	394,04	0,51
4CON2	365,70	0,55
4CON3	384,52	0,52
6CON1	465,82	0,43
6CON2	456,99	0,44
6CON3	462,88	0,44

Fonte: Autor.

Tabelas 5.7 – Esforço normal resistente característico NBR 8800 e NBR 16239

D (mm)	d (mm)	t (mm)	D/t	L (mm)	L/D	Ac (mm ²)	Aa (mm ²)	N _{pl,Rk} 8800 (kN)	N _{pl,Rk} 16239 (kN)
100	96	2	50	300	3	7238,229475	615,7521602	351,91	351,91

Fonte: Autor.

Tabelas 5.8 – Esforço normal resistente característico EC-4 sem confinamento

D (mm)	d (mm)	t (mm)	D/t	L (mm)	L/D	Ac (mm²)	Aa (mm²)	N_{pl,Rk} EC-4 (kN)
100	96	2	50	300	3	7238,229475	615,7521602	359,80

Fonte: Autor.

Tendo como parâmetro de bom comportamento da estrutura mista o intervalo $0,2 \leq \delta \leq 0,9$ é possível perceber que o grupo SCON não se comporta como tal, além de não haver grande transferência de carga do tubo de aço para o núcleo de concreto, sendo demonstrado pelo baixo índice de força (SI), devido à baixa aderência entre o aço e concreto. Aderência essa, otimizada com a inserção dos conectores, estando os demais grupos (4CON e 6CON) com índice de força e fator de contribuição dentro do intervalo esperado, possuindo resistência superiores a determinadas na Tabela 5.7 e 5.8.

Utilizando a Equação 2.9 foi calculado o esforço normal resistente característico levando em consideração o aumento da resistência provocado pelo efeito do confinamento, como demonstra a Tabela 5.9 (EUROCODE 4, 2004).

Tabelas 5.9 – Esforço normal resistente característico EC-4 com confinamento

D (mm)	d (mm)	t (mm)	D/t	L (mm)	L/D	Ac (mm²)	Aa (mm²)	N_{pl,Rk} EC-4 (kN)
100	96	2	50	300	3	7238,229475	615,7521602	463,76

Fonte: Autor.

Tabela 5.10 – Parcelas das resistências

Aço (kN)	Concreto (kN)	Misto (kN)	η_a	η_a Aço (kN)	η_c	η_c Concreto (kN)	Total (kN)
202	157,8	359,80	0,811924849	164	1,899637861	299,76	463,73

Fonte: Autor.

O grupo 6CON teve os índices de força acima de 1,35 demonstrando eficiência no confinamento, com a média de resistência 461,90 kN, valor este aproximadamente igual ao determinado na Tabela 5.9 e Tabela 5.10, estando abaixo apenas 0,40%, conforme memorial de cálculo no APÊNDICE B.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos nas análises, ensaios de caracterização e montagem de diferentes grupos de protótipos é possível concluir que:

- O concreto ensacado apresenta a resistência a compressão esperada, além de boa trabalhabilidade, tratando-se de material confiável e eficiente para aplicação nos protótipos de reforço.
- O primeiro grupo avaliado (TUBO) suportou baixa capacidade de carga, havendo escoamento localizado. Com o efeito de carga localizado e a formação da “pata de elefante”, faz-se necessário o reforço estrutural proposto.
- O grupo SCON apresentou um pequeno aumento de resistência, se comparado ao primeiro grupo (TUBO), perdendo rapidamente o contato com o núcleo de concreto, havendo assim, expansão lateral das bordas, como ocorrido no primeiro grupo. Isto demonstra possivelmente que apenas o efeito da aderência química entre o aço e o concreto acrescenta pouca efetividade ao reforço.
- O grupo 4CON apresentou um aumento de resistência significativo, mostrando que a ligação dos conectores ao núcleo de concreto proporcionou ao protótipo maior resistência, mobilizando o aço em conjunto com o concreto, comprovado pelo fator de contribuição calculado, mostrando a importância da aderência mecânica para a efetividade da seção mista.
- O grupo 6CON apresentou o maior aumento de resistência dentre todos os protótipos avaliados, e comportamento similar ao grupo com quatro conectores. Indicou, no entanto, que o maior número de conectores pode melhorar o comportamento do protótipo. Este grupo em específico foi o único com índices de força superior a 1,35, comprovando um reforço eficiente provocado pela transferência de carga dos conectores para o núcleo de concreto. Estando este grupo com resistência aproximadamente igual a calculada pelo EC-4, levando em consideração o confinamento.
- Os parafusos utilizados como reforço retardaram o escoamento localizado, inibindo a formação da “pata de elefante”, aumentando a resistência dos protótipos.

Assim sendo, espera-se que os resultados obtidos nessa dissertação contribuam para o desenvolvimento de novos trabalhos sobre estruturas mistas com o uso de conectores como reforço, bem como a utilização do concreto ensacado em perfis tubulares. Sendo assim, deixa como sugestão de trabalhos futuros:

- Avaliar a resistência do protótipo com tubos circulares de diferentes espessuras.
- Avaliar a resistência do protótipo com conectores de diâmetros diferentes.
- Avaliar a resistência do protótipo em situações de incêndio.
- Avaliar a resistência do protótipo à flexão.
- Utilizar ferramentas numéricas para estudos paramétricos dos protótipos, avaliando a variação de diâmetros e espessuras e ainda a influência do número de conectores e sua distribuição ao longo do protótipo.
- Utilizar anéis enrijecedores nas extremidades dos protótipos, dificultando a flambagem local típica das extremidades, aumentando assim a resistência dos mesmos.

REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR NM 67** – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, 1998.

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

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

_____. **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6152** – Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 7211** – Agregados para concretos - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7251** – Determinação da massa unitária do agregado em estado solto. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 9776** – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR 14762** - Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 16239** - Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistadas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares. Rio de Janeiro, 2013.

AZEVEDO, V. S.; LIMA, L. R. O.; VELLASCO, P. C. G. S. **Perfis tubulares mistos de aço e concreto: Comparativo preliminar para o dimensionamento entre as normas NBR 8800:2008, NBR 16239:2013 e Eurocode 4:2007**. Congresso latino-americano da construção metálica, CONSTRUMETAL 2016.

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.

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

BERGMANN, R., MATSUI, C., MEINSMA, C., DUTTA, D. **Design guide for concrete filled hollow section columns under static and seismic loading**. Construction with hollow steel sections 5, CIDECT. Verlag TUV Rheinland, 1995.

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

DE NARDIN, S.; EL DEBS, A. L. C. H.; EL DEBS, M. K.; SOUZA, A. S. C. **Estruturas mistas aço-concreto: origem, desenvolvimento e perspectiva**. Proceedings of the 47th Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, São Paulo, 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

EN 1994-1-1 (2004) (English): Eurocode 4: **Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**, CEN.

FADINI, Juliana Fadini Natalli, **Desempenho do concreto leve em seções mistas**. Dissertação de Mestrado, departamento de engenharia civil PROPEC, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

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

JOHANSSON, M., GYLLTOFT, K. **Structural behavior of slender circular steel-concrete composite columns under various means of load application**. Steel and Composite Structures, vol. 1, n. 4, p. 393-410, 2002.

JOHANSSON, M.; 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.

NARDIN, Silvana. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos composto por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. Dissertação de mestrado, escola de engenharia de São Carlos – UFScar, 1999.

NEVILLE, ADAM. **Propriedades do concreto**, II Edição, São Paulo, Pini, 1997.

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.

PETRUCCI, E. G. R., **Concreto de Cimento Portland**, 13ª Ed. São Paulo, 1998.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8.ed. Rio de Janeiro : LTC, 2009.

RIBEIRO NETO, Juliano Geraldo. **Análise teórico-experimental do uso de parafuso estrutural como conector de cisalhamento em pilar misto composto de perfil tubular preenchido com concreto**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil – PROPEC, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

RODRIGUES, Publio Penna Firme. **Parâmetros de Dosagem de concreto**. ET-67. 3 ed. São Paulo: IBRACON – Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

RODRIGUES, Bárbara Hellen. **Estudo da aderência ao aço dos concretos convencionais, leve e ar incorporado em seções mistas de perfis tubulares**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – PROPEC, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

SILVA, M. S.; GOMES, C. D.; SANGLARD, M. P. L.; OLIVEIRA, U. J. **Análise da eficiência do uso de concreto ensacado em edificações de pequeno porte**. Revista Educação, Meio ambiente e Saúde, vol. 7 n° 4, p. 20-41, 2017.

APÊNDICE A

7. Agregado miúdo

Tabela 7.1- Ensaio de granulométrico do agregado miúdo (Amostra 1)

Determinação			
Peneira (mm)	Material retido (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)
4,80	1,91	0,382	0,382
2,40	6,14	1,228	1,61
1,20	40,22	8,04	9,65
0,60	150,55	30,11	39,76
0,30	250,61	50,12	89,88
0,15	44,73	8,94	98,82
Fundo	5,84	1,18	100
Total	500	100%	

Fonte: Autor.

Dimensão máxima característica = 4,8 mm

$$\text{Retirada acumulada} = \frac{\text{material retido}}{\text{material total}} \times 100 \quad \text{Equação 7.0.1}$$

$$\text{Módulo de Finura} = \frac{\text{Soma do retido (\%)}}{100} \quad \text{Equação 7.0.2}$$

MF = 2,4



Figura 7.1 – Agitador mecânico agregado miúdo.

Fonte: Autor.

Tabela 7.2- Ensaio de granulométrico do agregado miúdo (Amostra 2)

Determinação			
Peneira (mm)	Material retido (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)
4,80	0	0	0
2,40	5,65	1,13	1,13
1,20	28,47	5,694	6,824
0,60	124,70	24,94	31,764
0,30	276,15	55,23	86,994
0,15	57,07	11,414	98,408
Fundo	7,96	1,592	100
Total	500	100%	

Fonte: Autor.

Dimensão máxima característica = 2,4 mm

$$Retirada\ acumulada = \frac{material\ retido}{material\ total} \times 100 \quad \text{Equação 7.0.1}$$

$$Módulo\ de\ Finura = \frac{Soma\ do\ retido\ (\%)}{100} \quad \text{Equação 7.0.2}$$

MF = 2,25

Tabela 7.3- Ensaio de granulométrico do agregado miúdo (Amostra 3)

Determinação			
Peneira (mm)	Material retido (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)
4,80	2,14	0,428	0,428
2,40	6,30	1,26	1,688
1,20	45,97	9,194	10,882
0,60	171,40	34,28	45,162
0,30	232,95	46,59	91,752
0,15	37,25	7,45	99,202
Fundo	3,99	0,798	100
Total	500	100%	

Fonte: Autor.

Dimensão máxima característica = 4,8 mm

$$\text{Retirada acumulada} = \frac{\text{material retido}}{\text{material total}} \times 100 \quad \text{Equação 7.0.1}$$

$$\text{Módulo de Finura} = \frac{\text{Soma do retido (\%)}}{100} \quad \text{Equação 7.0.2}$$

MF = 2,49

7.1. Agregado graúdo

A ABNT NBR 7211:2009 regulamenta o ensaio, definindo com agregado graúdo o grão que passa pela peneira com diâmetro de 75 mm e ficam retidos na peneira de diâmetro 4,8 mm.

Tabela 7.4 - Ensaio de granulométrico do agregado graúdo (Amostra 1)

Percentagem em peso			
Peneira (mm)	Material retido (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)
75	0	0	0
25	2150	43	43
19	2180	43,6	86,6
9,50	640	12,8	99,40
Fundo	30	0,60	100
Total	5000	100%	

Fonte: Autor.

Dimensão máxima característica = **25 mm**



Figura 7.2 – Agitador mecânico agregado graúdo.

Fonte: Autor.

Tabela 7.5 - Ensaio de granulométrico do agregado graúdo (Amostra 2)

Porcentagem em peso			
Peneira (mm)	Material retido (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)
75	0	0	0
25	0	0	0
19	800	16	16
9,50	4120	82,4	98,4
Fundo	80	1,60	100
Total	5000	100%	

Fonte: Autor.

Dimensão máxima característica = **25 mm**

7.2. Massa específica do agregado miúdo

A massa específica é a razão entre a massa e volume de sólidos, sendo excluídos os vazios. A ABNT NBR 9776:2003 regulamenta o ensaio que define a massa específica do agregado miúdo, utilizando o frasco de Chapman.

Tabela 7.6- Ensaio de massa específica

Determinação			
MS	Massa de areia seca (g)	500	500
LO	Leitura inicial (cm ³)	200	200
L	Leitura final (cm ³)	390	375
P	Massa específica (kg/dm ³)	2,63	2,86
	Valor médio (kg/dm ³)		2,74

Fonte: Autor.

$$P = \frac{Ms}{(L - Lo)} \quad \text{Equação. 7.2.1}$$

$$P = \frac{500}{(390 - 200)}$$

P1 = 2,63 (kg/dm³)

$$P = \frac{Ms}{(L - Lo)} \quad \text{Equação. 7.2.2}$$

$$P = \frac{500}{(375 - 200)}$$

$$P2 = 2,86 \text{ (kg/dm}^3\text{)}$$

$$\text{Média} = \frac{P1 + P2}{2} = 2,74$$

Equação 7.2.3

Sendo:

P = Massa específica em kg/dm³

L = Leitura final do frasco

Lo = Leitura inicial do frasco

Ms = Massa do material seco



Figura 7.3 – Frasco de Chapman.

Fonte: Autor.

7.3. Massa unitária

A massa unitária é a razão entre a massa e volume dos sólidos, incluindo os espaços vazios, sob determinadas condições de compactação. A ABNT NBR 7251:1982 regulamenta o ensaio que determina a massa unitária do agregado miúdo em estado solto.

Tabela 7.7 - Ensaio de massa unitária do agregado miúdo

	Determinação	1° Amostra	2° Amostra
Mr	Massa do recipiente (kg)	0,36	0,36
Mra	Massa do rec. + amostra (kg)	2,670	2,820
Vr	Volume do recipiente (cm ³)	1731,92	1731,8
Total	Kg/dm ³	1,34	1,42

Fonte: Autor.

Massa Unitária 1: 1,34 kg/dm³Massa Unitária 2: 1,42 kg/dm³Média: **1,38 kg/dm³**

Tabela 7.8 - Ensaio de massa unitária do agregado graúdo

	Determinação	1° Amostra	2° Amostra
Mr	Massa do recipiente (kg)	0,36	0,36
Mra	Massa do rec. + amostra (kg)	2,600	2,750
Vr	Volume do recipiente (cm ³)	1731,80	1731,8
Total	Kg/dm ³	1,29	1,38

Fonte: Autor.

Exemplo de cálculo:

$$\gamma_a = \frac{Mra \text{ (massa+recipiente)} - Mr \text{ (recipiente)}}{\text{Volume recipiente}}$$

$$\gamma_a = \frac{2,6 - 0,36}{1731,80}$$

$$\gamma_A = \mathbf{1,29 \text{ kg/dm}^3}$$

Equação 7.3.1.

Massa Unitária 1: 1,29 kg/dm³Massa Unitária 2: 1,38 kg/dm³Média: **1,33 kg/dm³**

Tabela 7.9- Ensaio de massa unitária compactada do agregado graúdo

	Determinação	1° Amostra	2° Amostra
Mr	Massa do recipiente (kg)	0,36	0,36
Mra	Massa do rec. + amostra (kg)	2,99	3,040
Vr	Volume do recipiente (cm ³)	1731,8	1731,8
Total	Kg/dm ³	1,52	1,55

Fonte: Autor.

Exemplo de cálculo:

$$\gamma_a = \frac{Mra \text{ (massa+recipiente)} - Mr \text{ (recipiente)}}{\text{Volume recipiente}} \quad \text{Equação 7.3.2}$$

$$\gamma_a = \frac{2,99 - 0,36}{1731,8}$$

$$\gamma_A = 1,52 \text{ kg/dm}^3$$

Massa Unitária 1: 1,52 kg/dm³Massa Unitária 2: 1,55 kg/dm³Média: **1,535 kg/dm³**

7.4. Cálculo do traço

$$F_{cj} = F_{ck} + 1,65 S_d \quad \text{Equação. 7.4}$$

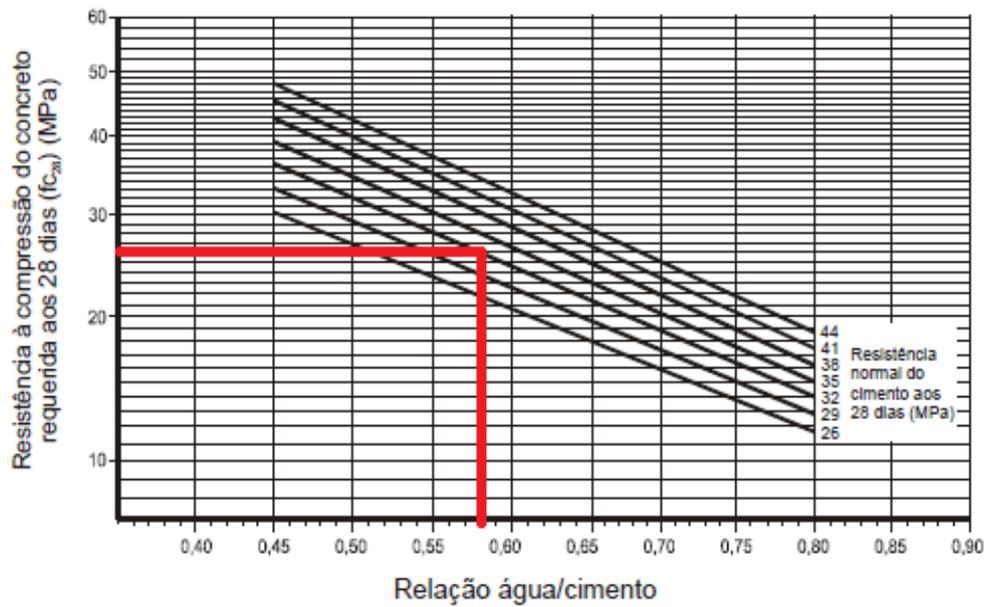
$$F_{28} = 20 + 1,65 \times 4$$

$$F_{c28} = 26,6 \text{ MPa}$$

7.5. Curva de Abrams

A curva de Abrams é utilizada para analisar a relação de água/cimento, a qual será utilizada na confecção do traço.

Gráfico 7.1 – Relação água/cimento e resistência a compressão.



Fonte: Rodrigues, (1998). Adaptado pelo autor

Relação a/c (água/cimento) = **0,58**.

7.6. O consumo de água

Tabela 7.10 – Abatimento slump test

Consumo de água aproximado (l/m ³)					
Abatimento (mm)	Dmax do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Neville (1997).

7.7. Consumo de cimento

$$Cc = \frac{ca}{\frac{a}{c}}$$

Equação 4.7.1

$$Cc = \frac{200}{0,58}$$

$$Cc = 344,83 \text{ kg}$$

7.8. O consumo de agregado graúdo

A definição do agregado graúdo é feita através do módulo de finura do agregado miúdo e também da dimensão máxima característica do agregado graúdo obtido nos ensaios (RODRIGUES, 1998). A Tabela 7.8.1 mostra o volume compactado seco de agregado graúdo por metro cúbico de concreto.

Tabela 7.11 – Determinação do consumo do agregado graúdo

MF	Dimensão máxima característica do agregado graúdo				
	9,5 mm	19,0 mm	25,0 mm	32,0 mm	38,0 mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Rodrigues (1998). Adaptada pelo autor.

$$C_b = V_b \times M_u$$

$$C_b = 0,735 \times 1535$$

$$C_b = 1128,2 \text{ kg}$$

Equação 7.8.1

7.9.O consumo do agregado miúdo

$$V_m = 1 - \frac{C_{\text{cimento}} + C_{\text{brita}} + C_{\text{água}}}{\gamma_c + \gamma_b + \gamma_a}$$

Equação 7.9.1

$$V_m = \frac{p}{\gamma}$$

$$V_m = 1 - \frac{344,83 + 1128,2 + 200}{3100 + 2550 + 1000}$$

Equação 7.9.2

$$V_m = 0,246 \text{ m}^3$$

$$P = 2740 \times 0,246$$

$$P = 674,90 \text{ kg}$$

7.10. Traço

Cimento: Areia: Brita: Água

$$\frac{344,83}{344,83} : \frac{674,90}{344,83} : \frac{1128}{344,83} : 0,58$$

$$1 : 1,957 : 3,27 : 0,58$$

$$1 : 2 : 3 : 0,58$$

APÉNDICE B

8. Memorial de Cálculo

8.1. $N_{pl,Rk}$ pela NBR 8800 (ABNT,2008) e NBR 16239 (ABNT, 2013)

$$N_{pl,Rk} = \left(\frac{\pi (100^2 - 96^2)}{4} \times 328,06 \right) + \left(\frac{\pi \times 96^2}{4} \times 21,80 \times 0,95 \right) + 0$$

$$N_{pl,Rd} = 351.907,40 = 351,91 \text{ kN}$$

8.2. $N_{pl,Rk}$ pelo Eurocode 4 sem confinamento

$$N_{pl,Rk} = \left(\frac{\pi (100^2 - 96^2)}{4} \times 328,06 \right) + \left(\frac{\pi \times 96^2}{4} \times 21,80 \times 1,0 \right) + 0$$

$$N_{pl,Rd} = 359.797,06 \text{ kN} = 359,80 \text{ kN}$$

8.3. $N_{pl,Rk}$ pelo Eurocode 4 com confinamento

$$F_{cm} = F_{ck} + 8 = 21,80 + 8 = 29,80 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{29,80}{10} \right)^{1/3} = 3165,88 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{cd} = \frac{3165,88}{1,2} = 2638,23 \text{ kN/cm}^2$$

$$I_a = \frac{\pi(10^4 - 9,6^4)}{64} = 73,95183443 \text{ cm}^4$$

$$I_c = \frac{\pi(9,6^4)}{64} = 416,9220177 \text{ cm}^4$$

$$EI_e = (20000 \times 73,95183443) + (0,6 \times 2638,23 \times 416,9220177) \\ = 2.138.998,393 \text{ kN.cm}^2$$

$$N_e = \frac{\pi^2(2.138.998,393)}{30^2} = 23.456,74217 \text{ kN}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{359,7970562}{23456,74217}} = 0,123849699$$

$$\eta_{a0} = 0,25 (3 + 2 \times 0,123849699) = 0,811924849$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5 \times 0,123849699 + 17 \times 0,123849699^2 = 2,869539284$$

$$N_{pl,Rk} = (0,811924849 \times 6,157521602 \times 32,806) + \left(72,38229475 \times 2,18 \times \left(1 + 2,869539284 \cdot \frac{2}{96} \frac{32,806}{2,18} \right) \right) + 0$$

$$N_{pl,Rk} = 463,76 \text{ kN}$$

8.4. Exemplo de cálculo índice de força

$$\delta = \frac{\left(\frac{\pi (100^2 - 96^2)}{4} \times 328,06 \right)}{209470} = 0,96$$

8.5. Exemplo de cálculo fator de contribuição

$$SI = \frac{209470}{0,000615758 \times 328060000 + 0,85 \times 0,007238229 \times 21800000} = 0,62$$