

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DA ADERÊNCIA EM PERFIS TUBULARES DE AÇO
PREENCHIDOS COM CONCRETO GEOPOLIMÉRICO**

Autora: Laura Beatriz Medina Duarte

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Paulino Aguilar

Belo Horizonte

Fevereiro/2017

Laura Beatriz Medina Duarte

**ESTUDO DA ADERÊNCIA EM PERFIS TUBULARES DE AÇO
PREENCHIDOS COM CONCRETO GEOPOLIMÉRICO**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais metálicos para Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2017

D812e

Duarte, Laura Beatriz Medina.

Estudo da aderência em perfis tubulares de aço preenchidos com concreto geopolimérico [manuscrito] / Laura Beatriz Medina Duarte. – 2017.

xiii, 90 f., enc.: il.

Orientador: Francisco Carlos Rodrigues.

Coorientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 89-90.

Bibliografia: f. 85-88.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses.
3. Geopolímeros - Teses. I. Rodrigues, Francisco Carlos. II. Aguiar, Maria Teresa Paulino. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)

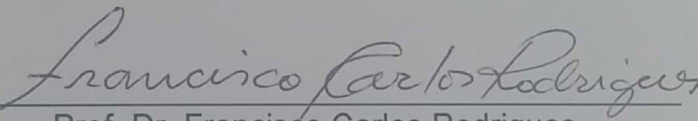
LAURA BEATRIZ MEDINA DUARTE

"ESTUDO DA ADERÊNCIA EM PERFIS TUBULARES DE AÇO
PREENCHIDOS COM CONCRETO GEOPOLIMÉRICO"

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.


Belo Horizonte, 21 de fevereiro de 2017

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
Orientador - UFMG


Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar
Coorientadora - UFMG


Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra
CEFET


Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas
UFMG

Dedicada a Dios.

“Dios, en su gracia, nos ha dado dones diferentes para hacer bien determinadas cosas. Por lo tanto, si Dios te dio la capacidad de profetizar, habla con toda la fe que Dios te haya concedido. Si tu don es servir a otros, sírvelos bien. Si eres maestro, enseña bien. Si tu don consiste en animar a otros, anímalos. Si tu don es dar, hazlo con generosidad. Si Dios te ha dado la capacidad de liderar, toma la responsabilidad en serio. Y si tienes el don de mostrar bondad a otros, hazlo con gusto”

Romanos 12:6-8

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por ter colocado no meu coração a vontade de vir ao Brasil, não só para a realização deste trabalho e sim para ter o privilégio de aprender e crescer com os seus ensinamentos nesta etapa da minha vida.

Aos meus mestros de vida, meus pais, Luis Fernando e Ana Beatriz, por ter me ensinado a sonhar, a ser corajosa, a acreditar nas minhas capacidades e que a força não é apenas física, mas também espiritual.

Ao meu irmão José Fernando e minha cunhada María Catalina, por acreditar nas minhas capacidades e porque além da distância sempre tiveram o tempo e a disposição para estar ao meu lado.

Ao meu irmão Juan Francisco, que com seu carinho e o seu coração humilde me apoiou desde um princípio, lembrando-me minhas fortalezas e ajudando-me a superar minhas fraquezas.

Ao meu Orientador Prof. Francisco Carlos Rodrigues, pela orientação, o apoio, a confiança depositada e por compartilhar seu conhecimento.

À minha Coorientadora Prof^a. Maria Teresa Paulino, pela dedicação, o incentivo, a paciência e por me ajudar a enxergar o mundo desde outra perspectiva.

À minha grande amiga Ángela Real, pela amizade, porque além da distância sempre me escutou, aconselhou e apoiou não só em tempos de alegria, mas também em tempos de tristeza.

Ao meu grande amigo José Paz Hurtado, porque graças a ele sempre tive um sorriso, um abraço e um conselho que me fizeram sentir em casa.

À Adelina Gomes de Azevedo, pelo carinho, a grande parceria, por ser minha tia aqui no Brasil e por me dar o privilégio de fazer parte da sua família.

Ao Luiz Fernando Pereira por me ensinar o valor da paciência, pela companhia e carinho que me ofereceu.

Às minhas amigas Raquel, Camila, Petra e Aline pela disposição, amor e paciência que tiveram comigo.

Aos colegas Dayana Gonçalves, Fabiana, Juliane, Bruna, Pedro, Eduardo, Paulo Guilherme e aos colegas do Laboratório de Caracterização de Materiais da UFMG pela grande ajuda para a realização deste projeto.

Aos meus colegas do Departamento de Estruturas (DEES) por me acolher, ajudar e apoiar no dia a dia.

Aos funcionários do Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) pela paciência e a disposição.

À Wincret Design Concrete Products LTDA pela doação dos materiais para a fabricação da pasta geopolimérica.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FAPEMIG (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro.

RESUMO

Desde o início da utilização do cimento Portland, a engenharia tem se enfrentado ao desafio da diminuição das emissões de CO₂ e da quantidade de energia consumida no processo de produção do cimento Portland. Dentre a busca de soluções que cumpram com os requisitos de sustentabilidade e construtivos, destaca-se a utilização de cimentos ativados alcalinamente ou também denominados geopoliméricos. As estruturas mistas de aço e concreto estão sendo implementadas na construção civil como uma alternativa para a utilização de elementos estruturais de melhor desempenho e menor custo. Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre a aderência e o comportamento dos perfis tubulares de aço preenchidos com concreto geopolimérico. Foram testadas quatro séries de corpos de prova, considerado uma série com corpos de prova de seção retangular com corte longitudinal, outra série com corpos de prova de seção retangular sem corte longitudinal, outra série com corpos de prova de seção quadrada sem corte longitudinal e uma série com corpos de prova de seção circular sem corte longitudinal. Cada série estava conformada por dois perfis preenchidos com concreto geopolimérico e dois perfis preenchidos com concreto convencional, totalizando dezesseis corpos de prova. Cada corpo de prova foi submetido a uma força axial de compressão aplicada ao núcleo de concreto, tendo sido adotado como apoio dos ensaios as bases dos perfis de aço para permitir o deslizamento relativo entre os dois componentes. Os resultados mostraram uma diferença no comportamento dos perfis preenchidos com concreto geopolimérico quando comparado com perfis preenchidos com concreto convencional e um aumento da tensão de aderência entre o aço e o concreto geopolimérico.

Palavras-chave: Ativação alcalina, Geopolímero, Concreto geopolimérico, Estrutura mista de aço e concreto.

ABSTRACT

Portland Cement production is commonly associated with high CO₂ emissions and it is also considered an energy intensive process. As a result, engineering and science have been looking for solutions to reduce emission and energy consumption. In the searching of sustainable solutions the use of alkali activated cements, also called geopolimeryc cements is highlighted. Nowadays steel-concrete structures are being implemented in civil construction as an alternative for the use of structural elements with better performance and lower cost. This paper presents experimental studies about the adherence and behavior of geopolymeryc concrete-filled steel tubes. Four models were designed and four prototypes per model were tested. The first and second model have rectangular cross sections with and without longitudinal cuts respectively. The third model presents square cross sections without a longitudinal cut and the final model has circular cross sections without longitudinal cut. In the experiment, two prototypes of each model were filled with geopolymeryc concrete-steel tubes, while the other two with concrete-steel tubes, for a total of sixteen tests. A compressed axial load was applied to the concrete core of each prototype, the steel tube was used as support of each test to allow relative sliding between the two materials. The results show a difference in the performance of geopolymeryc concrete, and concrete-filled steel tubes. Another finding was of this study was the increase of the shear transfer between steel and geopolymeryc concrete.

Keywords: Alkali Activation, Geopolymer, Geopolymeryc Concrete, Steel-Concrete Structures.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Considerações gerais	4
3.1.1 Pilares mistos de aço e concreto.....	4
3.1.2 Tipo de perfis e seções típicas	5
3.1.3 Efeito do Confinamento no aço e no concreto	6
3.1.4 Retração do concreto	8
3.1.5 Ensaio Push-out	8
3.1.6 Interação entre o aço e o concreto	9
3.1.7 Desempenho dos perfis tubulares preenchidos	11
3.2 Geopolímero.....	16
3.2.1 Definição e história	16
3.2.2 Síntese	18
3.2.3 Propriedades	20
3.2.3.1 Resistência à compressão	20
3.2.3.2 Resistência à tração.....	22
3.2.3.3 Módulo de Elasticidade.....	24
3.2.3.4 Resistência ao Fogo.....	24
3.2.3.5 Aderência.....	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	30

4.1	Materiais	32
4.2	Métodos.....	35
4.2.1	Testes preliminares	35
4.2.2	Aquisição de materiais.....	42
4.2.3	Preenchimento dos perfis tubulares.....	45
4.2.4	Ensaio.....	49
4.2.4.1	Testes de cisalhamento direto.....	49
4.2.4.2	Ensaio de caracterização do material.....	50
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
5.1	Testes preliminares	52
5.1.1	Análise de resultados dos corpos de prova de seção quadrada.	52
5.1.2	Análise de resultados dos corpos de prova de seção circular.	54
5.1.3	Análise de resultados dos corpos de prova de seção retangular.	57
5.2	Difração de raios-x (DRX).....	60
5.3	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	62
5.4	Microestrutura eletrônica de varredura (MEV)	63
5.5	Resistência à compressão.....	64
5.6	Ensaio de cisalhamento.....	70
5.6.1	Análise de resultados dos corpos de prova de seção retangular sem corte longitudinal.....	71
5.6.2	Análise de resultados dos corpos de prova de seção retangular com corte longitudinal.....	74

5.6.3	Análise de resultados dos corpos de prova de seção quadrada sem corte longitudinal.	77
5.6.4	Análise de resultados dos corpos de prova de seção circular sem corte longitudinal.	79
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
8.	ANEXOS.....	89
8.1	Análise granulométrica da brita.....	89
8.2	Análise granulométrica da areia.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Seções típicas de perfis tubulares	5
Figura 3.2 - Pilares revestidos. (a) Pilar totalmente revestido por concreto, (b) Pilar parcialmente revestido por concreto.	6
Figura 3.3 - Algumas configurações de pilares preenchidos com armadura adicional... 6	
Figura 3.4 - Disposição das tensões nos pilares mistos de aço e concreto para diferentes estágios de carregamento: a) $v_a \geq v_c$; b) $v_a \leq v_c$	7
Figura 3.5 - Confinamento efetivo do concreto em pilares mistos de aço e concreto. ...	8
Figura 3.6 - Esquema de ensaio Push-out.	9
Figura 3.7 - Tipos de transferências na interface de aço e concreto. (a) adesão, (b) aderência, (c) atrito.	11
Figura 3.8 - Gráfico força versus deslizamento.	12
Figura 3.9 - Gráfico força versus deslizamento obtidos dos corpos de prova circulares.	13
Figura 3.10 - Gráfico força versus deslizamento obtidos dos corpos de prova circulares.	15
Figura 3.11 - Resenha histórica sobre a evolução dos cimentos alcalinos ou ativados alcalinamente.....	17
Figura 3.12 - Modelo conceitual da geopolimerização.	19
Figura 3.13 - Famílias ou monómeros base dos geopolímeros.	20
Figura 3.14 - Resistência à compressão dos corpos de prova em função do tempo. ...	21
Figura 3.15 - Incremento do módulo de elasticidade versus tempo de cura.	24
Figura 3.16 - Gráficos temperatura versus tempo: a) Geopolímero com diferentes adições de KOH; b) Geopolímero com diferentes adições de metacaulim; c) Geopolímero com diferentes adições de silicato de sódio.....	25
Figura 3.17 - Gráficos temperatura versus tempo.	26
Figura 3.18 - Gráfico tensão de aderência versus deslizamento.	29

Figura 4.2 - Perfis tubulares utilizados na segunda etapa.....	34
Figura 4.3 - Material fornecido pela Wincret Designer Concrete Products LTDA: a) precursor; b) ativador.....	34
Figura 4.4 - Esquema do ensaio de deslizamento do pilar misto circular.	39
Figura 4.5 - Esquema ensaio utilizado.	39
Figura 4.6 - Aplicação da solução de Cloreto de Ferro: a) aplicação; b) lavagem; c) concreto fabricado.	45
Figura 4.7 - Concretagem dos perfis preenchidos com o concreto geopolimérico I: a) material utilizado; b) mistura; c) concreto fabricado.	46
Figura 4.8 - Concretagem dos perfis preenchidos com o concreto geopolimérico II: a) material utilizado; b) mistura; c) confecção corpos de prova 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura; d) perfis preenchidos.	47
Figura 4.9 - Verificação do Slump do concreto convencional.	47
Figura 4.10 - Concretagem dos perfis preenchidos com o concreto convencional: a) mistura; b) preenchimento; c) perfis preenchidos.....	48
Figura 4.11 - Corpos de prova cilíndricos de 10 centímetros por 20 centímetros: a) concreto geopolimérico I; b) concreto geopolimérico II; c) concreto convencional.	
Fonte: Autor.....	48
Figura 4.12 - Esquema de ensaio utilizado nos perfis tubulares preenchidos.	50
Figura 5.1 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal quadrada.	54
Figura 5.2 - Tensão de aderência versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal quadrada.	54
Figura 5.3 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal circular.....	56
Figura 5.4 - Tensão de aderência <i>versus</i> deslizamento dos corpos de prova com seção transversal circular.....	57

Figura 5.5 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular.	58
Figura 5.6 - Tensão de aderência versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular.	59
Figura 5.10 - Ruptura corpos de prova de concreto geopolimérico: a) concreto geopolimérico I; b) concreto geopolimérico II.	68
Figura 5.13 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular com e sem corte longitudinal preenchidos com concreto convencional.	75
Figura 5.14 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular com corte longitudinal.	76
Figura 5.15 Tensão de aderência <i>versus</i> deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular com corte longitudinal.	76
Figura 5.16 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal quadrada sem corte longitudinal.	78
Figura 5.21 - Tensão de aderência <i>versus</i> deslizamento dos corpos de prova com seção transversal circular sem corte longitudinal.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação e procedimento de limpeza utilizado no aço, vidro e alumínio.	27
Tabela 2 - Resultados dos testes de cisalhamento.	28
Tabela 3 - Características dos perfis utilizados nos ensaios preliminares.	32
Tabela 4 - Traço do concreto auto adensável.	33
Tabela 5 - Características dos perfis utilizados na segunda etapa.	34
Tabela 6 - Proporções dos materiais constituintes do concreto geopolimérico I.	34
Tabela 7 - Proporções dos materiais constituintes do concreto geopolimérico II.	35
Tabela 8 - Traço para 1 m ³ de concreto convencional.	35
Tabela 9 - Dimensões e classificação das séries dos corpos de prova, com as dimensões médias medidas.	41
Tabela 10 - Dimensões dos corpos de prova preenchidos com o concreto geopolimérico I.	43
Tabela 11 - Dimensões dos corpos de prova preenchidos com o concreto geopolimérico II. Fonte: Autor.	43
Tabela 12 - Dimensões dos corpos de prova preenchidos com o concreto convencional.	44
Tabela 13 - Resultados dos ensaios experimentais.	52
Tabela 14 - Tensões de aderência obtidas nos ensaios de deslizamento.	60
Tabela 15 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico I aos 28 dias.	64
Tabela 16 - Carga de ruptura do corpo de prova do concreto geopolimérico I aos 45 dias.	65
Tabela 17 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico I aos 73 dias.	65

Tabela 18 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico II aos 8 dias.....	66
Tabela 19 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico II aos 14 dias.....	66
Tabela 20 - Carga de ruptura do corpo de prova do concreto geopolimérico II aos 28 dias.....	67
Tabela 21 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico II aos 56 dias.....	68
Tabela 22 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto convencional aos 14 dias.....	69
Tabela 23 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto convencional aos 28 dias.....	69
Tabela 24 - Resultados ensaios de cisalhamento direto (push out).	71
Tabela 25 – Tensões de aderência obtidas nos ensaios de deslizamento.	81

1. INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil requer uma constante inovação devido ao seu amplo campo de ação e às mudanças das necessidades do ser humano. Dentre as soluções que podem ter caráter inovador destacam-se as estruturas constituídas por elementos de aço preenchidos por concreto (estruturas mistas), pois, proporcionam maiores resistências à compressão e à tração dos elementos estruturais, e melhorando o desempenho dos sistemas construtivos, entre outras vantagens (AGUIAR *et al.*, 2015).

Segundo Rossi (2002), as estruturas mistas de aço e concreto são confeccionadas com o objetivo de melhorar o desempenho dos elementos estruturais por meio da transferência de carga de um material a outro. Da Silva (2006) cita que o tubo de aço e o concreto apresentam três tipos de interações naturais: adesão ou aderência química, a aderência mecânica e o atrito. Vários estudos, como o feito por Parsley *et al.* (2000), indicam que o atrito é o responsável pela maior parte da força de aderência existente entre o aço e o concreto.

Comumente se utiliza o ensaio de cisalhamento (*push out*) para testar os diferentes tipos de transferência de carga entre o núcleo de concreto e o perfil de aço.

No que se refere ao impacto ambiental dessas estruturas, a ecoeficiência fica comprometida, pois o concreto presente nos perfis é comumente associado a um grande impacto ambiental.

Seguindo Davidovits (2011), no processo de produção de uma tonelada de cimento Portland (um dos componentes do concreto) são geradas 0,55 toneladas de CO₂ incluindo 0,40 toneladas geradas pelo processo de queima de combustível de carbono.

Na procura de materiais de menor impacto ambiental capazes de substituir parcial ou totalmente o cimento, foi desenvolvido um cimento a base de sílica e aluminatos, alcalinamente ativado, o cimento geopolimérico. Segundo Davidovits (2011), na produção de uma tonelada de cimento geopolimérico são produzidas 0,184 toneladas de CO₂, ou seja, quantidade entre cinco ou seis vezes menor do que a gerada na produção de cimento Portland. Entre as propriedades desses novos aglomerantes, destaca-se sua elevada resistência ao ataque de ácidos e a soluções com presença de sal, adesão ao concreto, aço, vidro e cerâmicas e sua alta resistência ao fogo (1000°C aproximadamente) (DUXSON *et al.*, 2007).

Neste contexto, este trabalho estuda o desempenho de perfis de aço tubulares preenchidos com concreto geopolimérico no que se refere à aderência do concreto ao aço.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento de perfis tubulares de aço preenchidos com concreto geopolimérico quanto à aderência entre estes materiais.

Para que esse objetivo seja alcançado, os seguintes objetivos específicos devem ser atendidos:

1. verificar que o material utilizado para a fabricação do concreto geopolimérico apresenta características de um material ativado alcalinamente;
2. identificar a influência do tipo de concreto no desempenho dos perfis tubulares de aço preenchidos com concreto;
3. analisar a influência do tipo de seção transversal no deslizamento relativo entre o aço e o concreto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações gerais

Segundo a norma ABNT NBR 8800 (2008), “As estruturas mistas de aço e concreto [...] são aquelas formadas por componentes de aço e de concreto, armado ou não, trabalhando em conjunto”. Os elementos estruturais de concreto caracterizam-se pela sua elevada resistência à compressão e pelas diferentes propriedades que podem adquirir com os diferentes aditivos do mercado. O aço é um material que possui alta resistência à tração além da diversidade na sua produção. O preenchimento de concreto adiciona rigidez e resistência à compressão ao perfil tubular e reduz o potencial de flambagem local; o tubo de aço reforça o concreto para resistir à tensão, momento de flexão e cisalhamento (ROEDER *et al.*, (1999); HAN *et al.*, (2014)). Além disso, o tubo atua como fôrma para o concreto, economizando assim um grande custo de construção. Os componentes de aço são, usualmente, perfis soldados ou laminados com seção I, H, tubos circulares, quadrados ou retangulares e os perfis formados a frio, com uma diversidade de seção transversal.

3.1.1 Pilares mistos de aço e concreto.

Os pilares mistos de ao e concreto apresentam vantagens em relação aos puramente de aço e de concreto armado devido às diferentes características físicas e mecânicas com as quais são projetados. Com a variação da espessura do perfil, da resistência do concreto ou da adição de armaduras, são atingidas seções de diferentes resistências e dimensões constantes, beneficiando a geometria, o custo e a execução de um projeto.

3.1.2 Tipo de perfis e seções típicas

Os perfis tubulares existentes no mercado apresentam seções circulares, quadradas e retangulares, podendo ser fabricados a partir de da conformação a frio e posterior eletro-soldagem de chapas ou bobinas (perfis com costura) ou por laminação de barras com perfuração por mandril (perfis sem costura). No processo de produção dos perfis de geometria retangular e quadrada, é necessário dar ao tubo fabricado uma conformação a frio, com a ajuda de matrizes e rolos, de forma a se obter as seções e dimensões requeridas. Na Figura 3.1 se apresentam as seções típicas de perfis estruturais tubulares.



Figura 3.1- Seções típicas de perfis tubulares
Fonte: Autor

Dentre os pilares mistos destacam-se os pilares revestidos e os pilares preenchidos. Os pilares revestidos estão compostos por um perfil metálico envolvido total ou parcialmente com concreto estrutural conforme mostra a Figura 3.2.

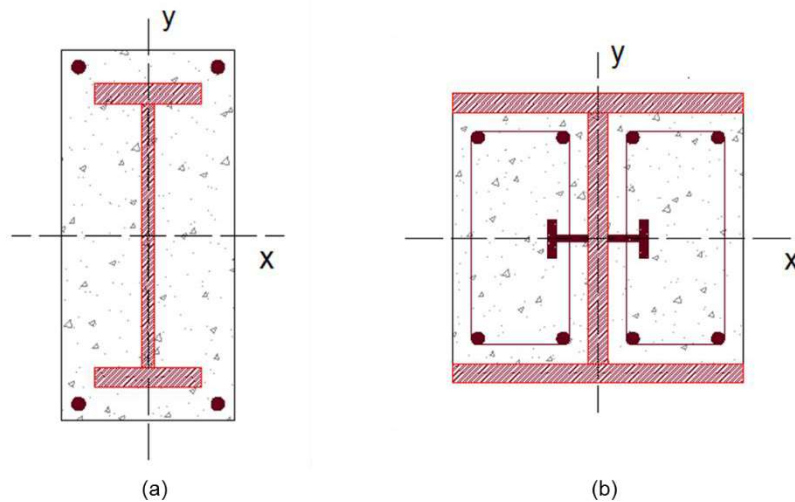


Figura 3.2 - Pilares revestidos. (a) Pilar totalmente revestido por concreto, (b) Pilar parcialmente revestido por concreto.
Fonte: Autor.

Os pilares preenchidos são tubos estruturais de aço que envolvem em sua totalidade o núcleo de concreto conforme mostra a Figura 3.3.

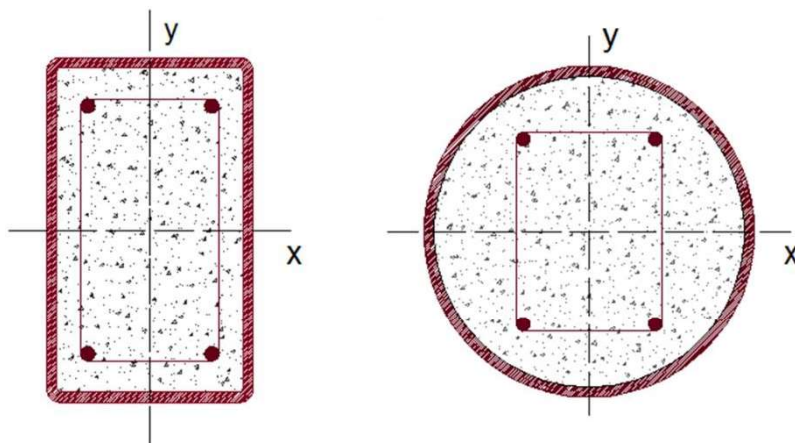


Figura 3.3 - Algumas configurações de pilares preenchidos com armadura adicional.
Fonte: Autor.

3.1.3 Efeito do Confinamento no aço e no concreto

Segundo Johansson & Gylltoft (2002) e Cardoso (2014), o efeito do confinamento nos pilares mistos está relacionado com a expansão dos materiais que estão interagindo. Devido que os dois materiais apresentam diferentes coeficientes de Poisson ($\nu_a = 0,30$ do aço e ν_c aproximadamente de 0,15 a 0,20 para o concreto), nos estágios iniciais de

carregamento, o perfil de aço apresenta uma expansão rápida na direção radial quando comparada com a expansão do núcleo de concreto. Com o aumento do carregamento, o concreto começa a se plastificar e as deformações laterais do concreto são retidas pelo perfil de aço, gerando tensões transversais de compressão no perfil de aço e tensões de tração no núcleo de concreto. Para carregamentos maiores, o perfil de aço restringe a expansão do núcleo de concreto, originando as tensões de confinamento. A Figura 3.4 apresenta a disposição das tensões nos pilares mistos de aço e concreto para diferentes estágios de carregamento.

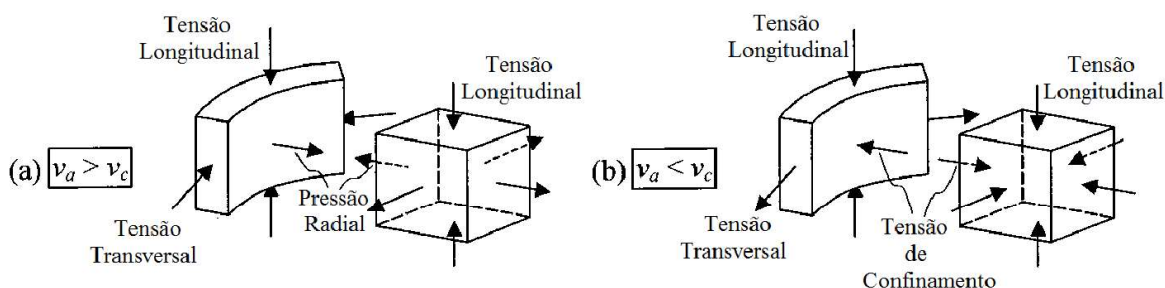


Figura 3.4 - Disposição das tensões nos pilares mistos de aço e concreto para diferentes estágios de carregamento: a) $v_a \geq v_c$; b) $v_a \leq v_c$.
Fonte: Johansson & Gylltoft (2002).

Segundo de Oliveira *et al.*, (2009) a tensão lateral introduzida pelo perfil de aço é a responsável pela resistência adicional dos pilares mistos de aço e concreto concentricamente carregados; nesta situação, o núcleo de concreto é submetido a um estado de tensão triaxial, enquanto o perfil de aço encontra-se num estado de tensão biaxial. Vários autores (SCHNEIDER (1998); SHANMUGAM & LAKSHMI (2001); HAN *et al.*, (2014); TAO *et al.*, (2016)) afirmam que os perfis de seção transversal circular são os que apresentam o ganho de capacidade de carga devido ao efeito de confinamento. As seções transversais quadradas e retangulares não apresentam este comportamento como se mostra na Figura 3.5.

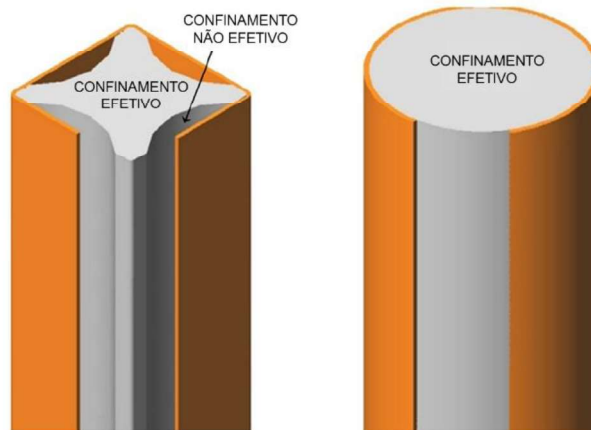


Figura 3.5 - Confinamento efetivo do concreto em pilares mistos de aço e concreto.
Fonte: De Oliveira et al., (2009)

3.1.4 Retração do concreto

Os pilares mistos de aço e concreto estão influenciados pela fluência e retração do concreto durante sua vida útil. À medida que a seção transversal do perfil tubular preenchido é maior, o calor de hidratação e a retração do núcleo de concreto torna-se crítico (HAN *et al.*, 2014). Devido que o excesso de água no concreto encontra-se aprisionado nos pilares mistos, se recomenda que a relação água cimento seja controlada, sendo que HAN *et al.*, (2014)) sugerem que uma relação água cimento maior de 0,4 é inapropriada para perfis tubulares preenchidos com concreto convencional. Segundo Chang *et al.* (2009) a retração do concreto pode não resultar em graves defeitos estruturais, mas deteriora a durabilidade do concreto; o efeito da retração do concreto nos pilares mistos é a diminuição da tensão de aderência entre o aço e o concreto.

3.1.5 Ensaios Push-out

O ensaio do tipo *push-out* é um teste de cisalhamento direto que tem sido utilizado para testar os diferentes tipos de transferência de carga entre o núcleo de concreto e o perfil

de aço. O ensaio consiste na aplicação de força axial, seja no núcleo de concreto ou na seção transversal do perfil, com a finalidade de gerar escorregamento entre os dois materiais e medir o deslocamento. A norma europeia EN 1994-1-1 de estruturas mistas (2004) estabelece uma especificação para o ensaio tipo *push-out*, com o objetivo de promover uma padronização desses ensaios (VERÍSSIMO. G.S, 2007, p. 16). A Figura 3.6 apresenta a representação do ensaio de cisalhamento direto (*push out*) adaptado ao presente estudo.

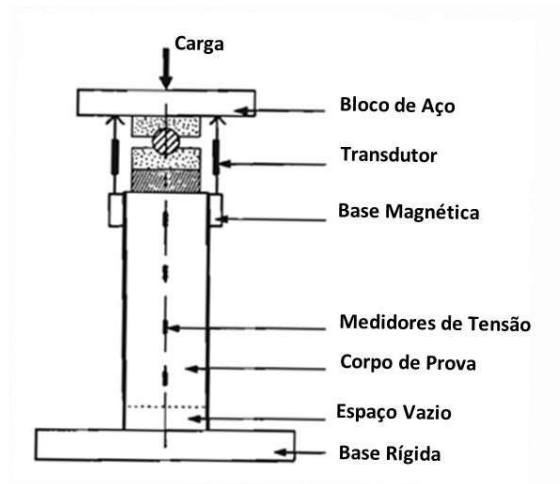


Figura 3.6 - Esquema de ensaio Push-out.
Fonte: Shakir-Khalil (1993).

3.1.6 Interação entre o aço e o concreto

A interação do aço e o concreto ocorre na transferência de carga entre os dois materiais, o que pode ser gerado por meio da adesão, aderência, atrito ou com a utilização de conectores de cisalhamento. O método *força x escorregamento do concreto* tem sido utilizado para o estudo da transferência de cisalhamento na interface de aço e concreto. Alguns estudos (PARSLEY *et al.* (2000); ROSSI (2002); SOMMA *et al.*, (2016)) indicam que existem três mecanismos de transferência responsáveis pela aderência natural: adesão, aderência mecânica e atrito.

A adesão é a força de atração que mantém ligadas as moléculas de distintas espécies químicas, também é denominada aderência química. Segundo Da Silva (2006) a adesão é considerada um mecanismo elasto frágil que se manifesta nos estágios iniciais de carregamento, quando os deslocamentos na curva força x escorregamento do concreto ainda são pequenos e as tensões atingem valores máximos equivalentes a 0,1 MPa. Somma *et al.* (2016) afirmam que a adesão ou aderência química encontra-se relacionada com o efeito da retração do concreto dentro do perfil tubular.

A aderência mecânica está relacionada ao estado da superfície interna do tubo (rugosidade) (SOMMA *et al.* (2016)), sendo este mecanismo de transferência a resultante do engrenamento mecânico entre o concreto e as irregularidades superficiais internas do perfil. Segundo Da Silva (2006) a parcela mecânica tem maior relevância apenas enquanto as superfícies do aço e do concreto estão em contato com o aumento da força aplicada, há tendência ao deslocamento relativo entre os materiais. Segundo Campolina (2008), em perfis tubulares a presença do confinamento atuante no concreto e a compressão transversal externa do aço impedem a separação entre as partes, aumentando assim a parcela de aderência entre os materiais. Como resultado deste fenômeno surgem tensões normais resistentes ao escorregamento. Neste caso, a aderência mecânica pode ser considerada um mecanismo parcial de atrito (PARSLEY *et al.* (2000)). DA SILVA (2006) afirma que adensamentos bem efetuados conduzem à obtenção de maior engrenamento entre o aço e o concreto, o que eleva a aderência mecânica.

O atrito depende da força normal aplicada na interface do aço e o concreto e do coeficiente de atrito, μ , que está relacionado ao grau de rugosidade da superfície do perfil tubular e à condição da interfase dos materiais (DA SILVA, (2006) e SOMMA *et*

al., (2016)). A Figura 3.7 mostra os tipos de transferência naturais entre o aço e o concreto.

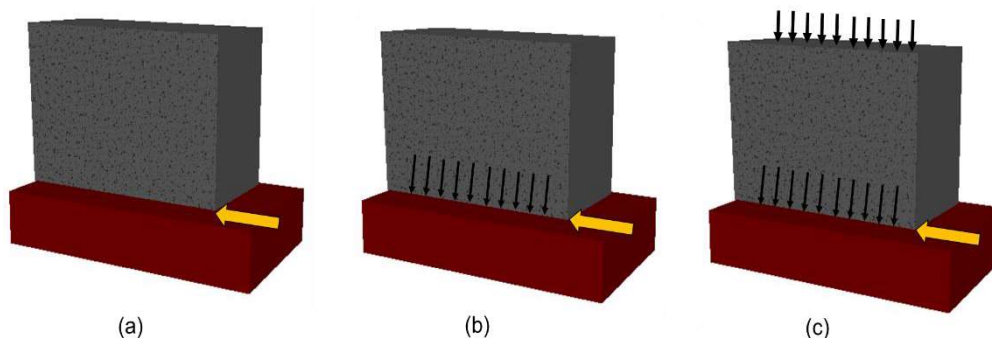


Figura 3.7 - Tipos de transferências na interface de aço e concreto. (a) adesão, (b) aderência, (c) atrito.
Fonte: Autor.

Os ensaios realizados seguiram em parte os procedimentos de cisalhamento direto (*push-out*) preconizados pela norma europeia EN 1994-1-1:2004, para a verificação do desempenho estrutural de conectores de cisalhamento no sistema de viga mista de aço e concreto. Nessa norma, um conector pode ser tomado como dúctil se a capacidade característica de deslizamento ($\bar{\delta}_{uk}$) for pelo menos de 6 mm; $\bar{\delta}_{uk}$ é tomado como o valor mínimo de $\bar{\delta}_u$ obtido num ensaio, reduzido em 10%, ou determinado por uma avaliação estatística de todos os resultados dos ensaios.

3.1.7 Desempenho dos perfis tubulares preenchidos

O objetivo do estudo de Parsley *et al.* (2000) foi identificar os mecanismos de transferência entre o núcleo de concreto e o tubo de aço, e a determinação do método para avaliar a resistência da interface de aço e concreto em pilares de estrutura mista. Foram testados oito pilares onde as variáveis estudadas foram a relação de diâmetro/espessura (b/t) do tubo de aço, o comprimento dos perfis e o tipo de apoio nas extremidades inferiores. Os diâmetros dos perfis foram de 203 mm e 254 mm, com resistência à compressão do concreto de 45 MPa e 40 MPa respectivamente. A

espessura da chapa do perfil era de 6,35 mm. A força axial foi aplicada sobre o núcleo de concreto que foi confeccionado para sobressair na extremidade superior do perfil, deixando assim um espaço vazio na extremidade inferior, com a finalidade de aplicar a força diretamente no concreto de preenchimento e que o modelo estivesse apoiado no tubo de aço. A Figura 3.8 apresenta um gráfico força *versus* deslizamento da pesquisa de Parsley *et al.* (2000), onde são observados os estágios das interações entre o aço e o concreto.

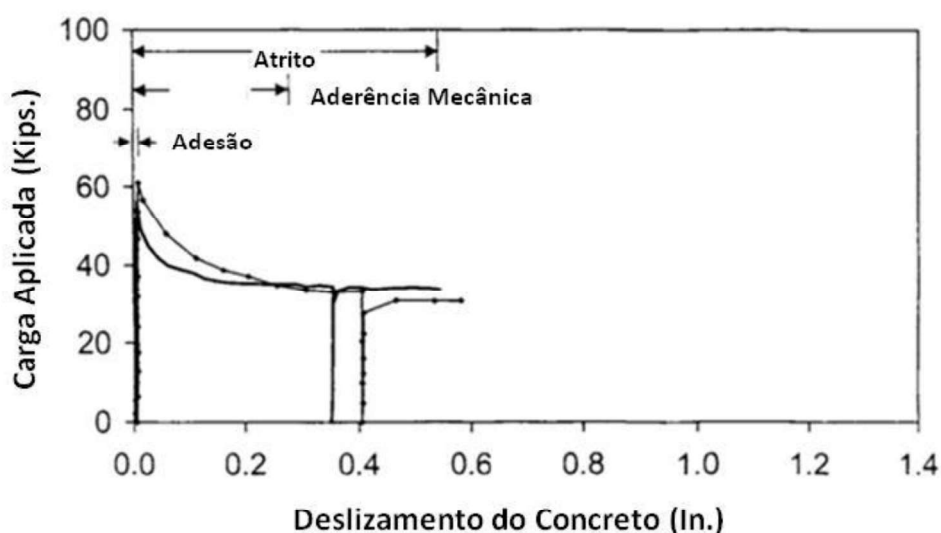


Figura 3.8 - Gráfico força versus deslizamento.
Fonte: Parsley, M. A; Yura, J. A; Jirsa, James O (2000).

Os resultados dos testes indicaram que são três os mecanismos responsáveis pela transferência de carga na interface de aço e concreto, adesão do concreto, aderência do núcleo de concreto com o aço e o atrito. Em relação à adesão, ela não é um mecanismo de transferência primária de carga, devido que uma vez atingida, não foi registrado o escorregamento do concreto. Depois de atingido o pico de força, observou-se o deslocamento do núcleo de concreto, evidenciando assim a influência da aderência e do atrito na transferência das tensões de cisalhamento. Perceberam que conforme aumentavam os valores da força aplicada, a distribuição de carga é uniforme ao longo do comprimento do perfil.

Campolina (2008) estudou a influência da presença da oxidação interna na aderência de pilares tubulares mistos preenchidos, comparou a influência das seções geométricas dos perfis tubulares em relação à aderência entre o aço e o concreto e fez uma análise computacional do comportamento dos materiais nos pilares tubulares circulares preenchidos com concreto solicitados à compressão. As variáveis utilizadas nos corpos de prova foram o tipo de seção (quadrada, circular e retangular), o tipo de perfil (com costura ou sem costura), o tipo de aço (VMB 350 COR ou CSN COR 420) e o tipo de tratamento na superfície interna do perfil (sem oxidação ou oxidado). Foram ensaiados um total de 36 corpos de prova dos quais 12 eram de seção quadrada, 12 de seção circular e 12 de seção retangular. O autor avaliou, através de ensaios laboratoriais de cisalhamento (*push out*), a interferência da aderência interna entre o núcleo de concreto e as paredes do perfil em aço. Campolina (2008) encontrou na sua pesquisa comportamentos similares aos obtidos por Parsley *et al.* (2000) onde podem ser observados os estágios de interação entre o aço e o concreto. A Figura 3.9 apresenta o gráfico força *versus* deslizamento dos perfis circulares ensaiados por Campolina (2008).

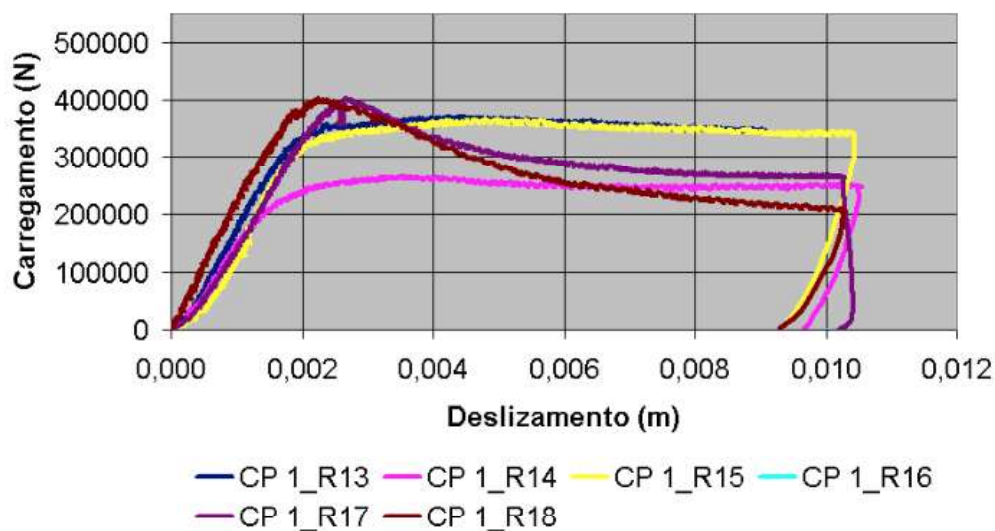


Figura 3.9 - Gráfico força versus deslizamento obtidos dos corpos de prova circulares.
Fonte: Campolina (2008).

Do estudo, Campolina concluiu que a adesão foi considerada local e eliminada assim que o núcleo de concreto apresentou o deslocamento. Após atingido o valor limite relativo à adesão o crescimento do gráfico foi promovido pelo atrito e a aderência mecânica. Uma vez atingido o carregamento máximo, se evidenciou um leve declínio na carga, o que é gerado pela perda da aderência. O atrito foi responsável por manter os valores do carregamento constantes apesar dos deslocamentos (Ver Figura 3.8).

Com relação à força de aderência entre o núcleo de concreto e o perfil de aço o autor verificou que foi maior (apesar de apresentar uma área de núcleo maior) nos perfis de seção circular que nos perfis de seções quadradas e retangulares. Em relação à influência da espessura do perfil de aço e o confinamento do concreto na tensão de aderência, o autor concluiu que os dois fatores são importantes devido que o perfil com maior espessura apresentou a maior resistência à transferência de carga pelo núcleo e que o perfil com maior confinamento atingiu uma das maiores cargas aplicadas, o que evidencia uma transferência de carga significativa e conseqüentemente uma resistência maior à tensão de aderência.

Tao *et al.*, (2016) investigaram o comportamento da aderência em perfis tubulares preenchidos com concreto. Realizou-se uma série de ensaios de tipo *push out* em perfis tubulares de seção transversal circular e de seção quadrada. Os principais parâmetros considerados na análise foram: a seção transversal, tipo de aço, tipo de concreto, a idade do concreto e o tipo de interface de aço e concreto. Foram testados 24 modelos, sendo 13 de seção transversal circular e 11 de seção transversal quadrada, variando a dimensão da seção de 120 milímetros até 600 milímetros. Os perfis tubulares de aço eram de duas naturezas, aço carbono e aço inoxidável. Utilizaram-se três tipos de concreto, um convencional, outro com agregado reciclado e um terceiro concreto expansivo. Foram geradas várias interfaces de aço e concreto, uma interface normal,

outra com conectores e uma com um anel interno. Os modelos foram testados com idade variável, de 31 dias até os 1176 dias. A Figura 3.10 apresenta um dos gráficos tensão de aderência versus deslizamento obtidos na pesquisa de Tao *et al.*, (2016).

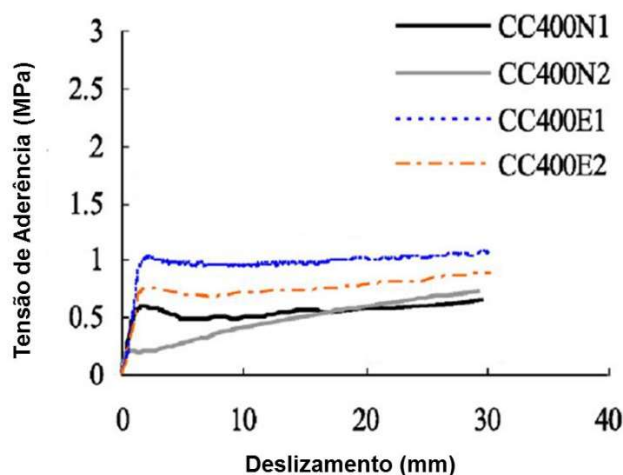


Figura 3.10 - Gráfico força versus deslizamento obtidos dos corpos de prova circulares.
Fonte: Tao *et al.*, (2016).

Da pesquisa os autores verificaram que a tensão de aderência apresentou uma diminuição nos perfis tubulares de aço inoxidável quando comparados com os perfis tubulares de aço carbono; eles associaram este fenômeno com a baixa rugosidade que apresenta o aço inoxidável. Conferiram também que a o perfil de seção transversal circular desenvolve forças de tensão de aderência maiores que os perfis tubulares de seção quadrada. Os autores concluíram que a influência da idade do concreto sobre a interação aço – concreto é significativa. Quanto maior é a idade do concreto, menor a tensão de aderência. Os comportamentos dos perfis tubulares estudados apresentaram semelhança aos estudos realizados por Parsley *et al.* (2000), Campolina 2008, Chang *et al.*, (2009), SOMMA *et al.*, (2016), onde são identificados os três estágios de interação de aço e concreto.

3.2 Geopolímero

3.2.1 Definição e história

Segundo Osório (2006) um geopolímero é basicamente um polímero inorgânico, obtido através da ativação alcalina de um alumino-silicato em determinadas condições de temperatura e de pressão. FENG *et al.*, (2012) definem geopolímero como polímeros inorgânicos sílico-aluminosos obtidos por meio da poli condensação de unidades tetraédricas de alumino silicatos e íons de metais alcalinos com propriedades cimentantes. Segundo Torgal *et al.*, (2005) os ligantes obtidos por ativação alcalina compreendem duas etapas, uma de dissolução da sílica e alumina da matéria prima, quando misturada com a solução alcalina (ativador) e outra de poli condensação e endurecimento dos produtos obtendo uma estrutura polimérica.

Em relação ao início da utilização do geopolímero, vários autores afirmam que existem indícios de materiais com características similares utilizados por civilizações antigas como a Romana, a Egípcia e a Grega (GLUKHOVSKY, 1989; DAVIDOVITS, 2012.). Os estudos desenvolvidos por Joseph Davidovits foram importantes na história da ativação alcalina, devido que, baseando-se em estudos químicos e mineralógicos, verificou que os blocos das pirâmides do Egito não são de pedra calcária natural mas sim de um ligante fabricado a partir da mistura de calcário oriundo de gize, produto da mistura de cal, carbonato de sódio e água (TORRAL et al., 2007, GONÇALVES 2016). Osório (2006) apresenta na Figura 3.11 uma breve resenha histórica sobre a evolução dos cimentos alcalinos ou ativados alcalinamente.

Autor	Ano	Descrição
Civilização Romana	Séc. I	Argamassas e betões pozolânicos
Feret	1939	Cimentos com escórias
Purdon	1940	Combinações alcalis-escórias
Glukhovsky	1959	Bases teóricas e desenvolvimento de cimentos alcalinos
Glukhovsky	1965	Primeiros cimentos alcalinos
Davidovits	1979	Termo "Geopolímero"
Malinowski	1979	Caracterização de aquedutos milenares
Forss	1983	Cimento tipo F (Escórias – alcalis – superplastificante)
Langton e Roy	1984	Caracterização de materiais em edifícios milenares
Davidovits e Sawyer	1985	Patente do cimento "Pyrament"
Krivenko	1986	Sistemas $R_2O - RO - SiO_2 - H_2O$
Malolepsy e Petri	1986	Activação de escórias sintéticas
Malek. et al.	1986	Cimentos de escórias com resíduos radioactivos
Davidovits	1987	Comparação entre betões correntes e betões milenares
Deja e Malolepsy	1989	Resistência ao ataque de cloretos
Kaushal et al.	1989	Cura adiabática de ligantes alcalinos com resíduos nucleares
Roy e Langton	1989	Analogias dos betões milenares
Majundar et al.	1989	Activação de escórias – $C_{12}A_7$
Talling e Brandstetr	1989	Activação alcalina de escórias
Wu et al.	1990	Activação de cimentos de escórias
Roy et al.	1991	Presença rápida de cimentos activados alcalinamente
Roy e Silsbee	1992	Revisão sobre cimentos activados alcalinamente
Palomo e Glasser	1992	Metacaulino com CBC
Roy e Malek	1993	Cimento de escórias
Glukhovsky	1994	Betões milenares, modernos e futuros
Krivenko	1994	Cimentos alcalinos
Wang e Scrivener	1995	Microestrutura de escórias activadas alcalinamente

Figura 3.11 - Resenha histórica sobre a evolução dos cimentos alcalinos ou ativados alcalinamente.
Fonte: Osorio (2006).

Apesar da evolução do conhecimento sobre os materiais ativados alcalinamente, ainda existem muitos aspectos que precisam de investigação (SEVERO *et al.*, 2013, GONÇALVES 2016). Devido à grande versatilidade destes materiais, encontra-se na literatura uma variedade de nomenclaturas adotadas, tais como: cimento ativado alcalinamente, geopolímeros, cerâmica alcalina, geocimento concreto de polímero inorgânico entre outras (SEVERO *et al.*, 2013).

3.2.2 Síntese

A ativação alcalina é a reação de síntese dos geopolímeros, se define como uma reação de hidratação de alumino-silicatos com substâncias alcalinas ou alcalino-ferrosos (SEVERO *et al.*, 2013). Segundo Gonçalves (2016), a ativação alcalina é um processo químico que transforma estruturas vítreas, parcial ou totalmente amorfas em um composto cimentante compacto.

Os materiais ativados alcalinamente encontram-se divididos em dois modelos, os cimentos álcali-ativados e os geopolímeros (TORGAL *et al.*, 2005). O primeiro modelo é um material com uma elevada percentagem de óxido de cálcio, quando ativado pelo meio de soluções alcalinas de baixa ou moderada concentração, cria um material de reação do tipo silicato de cálcio hidratado (TORGAL *et al.*, 2005). No segundo modelo o material é composto quase na sua totalidade por sílica e alumina, e ativado por soluções alcalinas de elevada concentração, dando como resultado uma reação de polimerização com uma estrutura similar à da zeólita do tipo analcima (DAVIDOVITS 1994, TORGAL *et al.*, 2005). Davidovits (2013) diferencia os modelos como geopolímeros e cimentos geopoliméricos, sendo os primeiros obtidos a temperaturas levemente superior à ambiente e inferiores aos 100°C; os segundos estão caracterizados por um endurecimento à temperatura ambiente.

A reação de um alumino-silicato sólido com uma alta concentração de hidróxido alcalino ou de silicato, produz um alumino-silicato alcalino sintético (DUXSON *et al.*, 2007). Davidovits (2002) explicou o fenômeno que acontece naturalmente com os alumino-silicatos como a caulinita, que se transformam em baixa temperatura e em um lapso curto de tempo em tecto-aluminosilicatos tridimensionais. Esse método de termoendurecimento é similar ao da policondensação das resinas orgânicas que produz

nanocompósitos. A reação de geo-síntese faz com que os átomos de Al, por meio da ativação alcalina alternam com os átomos de Si compartilhando oxigênio em coordenação tetraédrica (GONÇALVES 2016). Na Figura 3.12 é apresentado o modelo do processo de geopolimerização segundo Duxson *et al.*, (2007). Segundo Islam *et al.*, (2013), a polimerização encontra-se influenciada por parâmetros tais como a temperatura de cura, o conteúdo de água, a concentração alcalina, o conteúdo inicial de sólidos, a relação sílica alumina, o PH e o tipo de ativador utilizado.

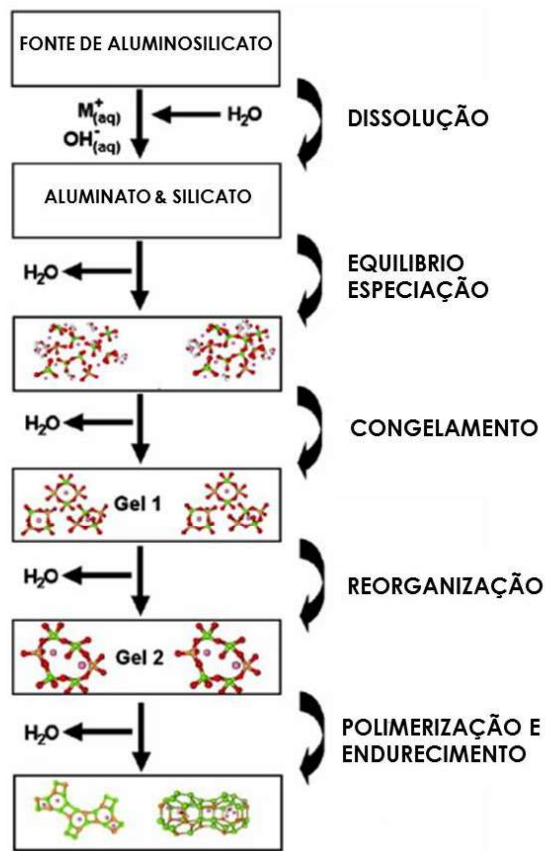


Figura 3.12 - Modelo conceitual da geopolimerização.
 Fonte: Duxson et al., (2007).

Para a síntese de estes materiais, Davidovits indica três tipos de monómeros ou famílias (Figura 3.13) de acordo com a razão atômica entre Si e Al (OSÓRIO 2006).

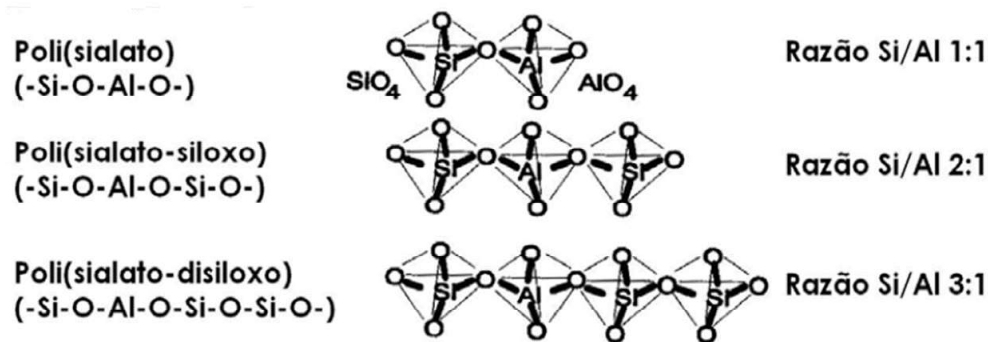


Figura 3.13 - Famílias ou monómeros base dos geopolímeros.
Fonte: Osório (2006).

3.2.3 Propriedades

Dependendo das matérias primas utilizadas e das condições do processo, os geopolímeros podem exibir uma grande variedade de propriedades e características, incluindo alta resistência à compressão, índice de baixa retração, aderência ao vidro, concreto e aço, resistência ao ácido, resistência ao fogo entre outras (DUXSON *et al.*, 2007, SEVERO *et al.*, 2013).

3.2.3.1 Resistência à compressão

O geopolímero apresenta elevadas resistências iniciais à compressão num curto intervalo de tempo. Zongjin *et al.*, (2004) afirmam que o geopolímero atinge até 70% da sua resistência máxima à compressão nas primeiras 4 horas após a sua fabricação. Islam *et al.*, (2013) estudaram a influência das cinzas de óleo de palmeira, da escória de alto forno, das cinzas com baixo teor de cálcio e da areia grossa na resistência à compressão de argamassas geopoliméricas. Neste estudo eles encontraram que a maioria dos modelos testados alcançou até 86% da resistência à compressão com uma idade de três dias. No estudo, os autores atingiram uma resistência máxima à compressão de 66 MPa com uma idade de 28 dias, para uma mistura de 30% de cinzas de óleo de palmeira e 70% de escória de alto forno.

Gonçalves (2016) caracterizou os cimentos geopoliméricos produzidos com materiais comercializados no Brasil, testando as relações precursor/ativador sugerido pelos fabricantes dos cimentos e se baseando na literatura. Foram elaboradas seis misturas diferentes variando o tipo de precursor e do ativador, no total se ensaiaram 72 corpos de prova de 25 mm de diâmetro e 50 milímetros de comprimento. A autora realizou testes à compressão do cimento nas idades de 6 horas, 24 horas, 7 dias e 28 dias. Foi observado um crescimento linear da resistência de algumas amostras, outras apresentaram uma desaceleração à medida que ganhavam resistência. A Figura 3.14 apresenta os resultados da resistência à compressão das amostras em função do tempo atingidos na pesquisa de Gonçalves (2016).

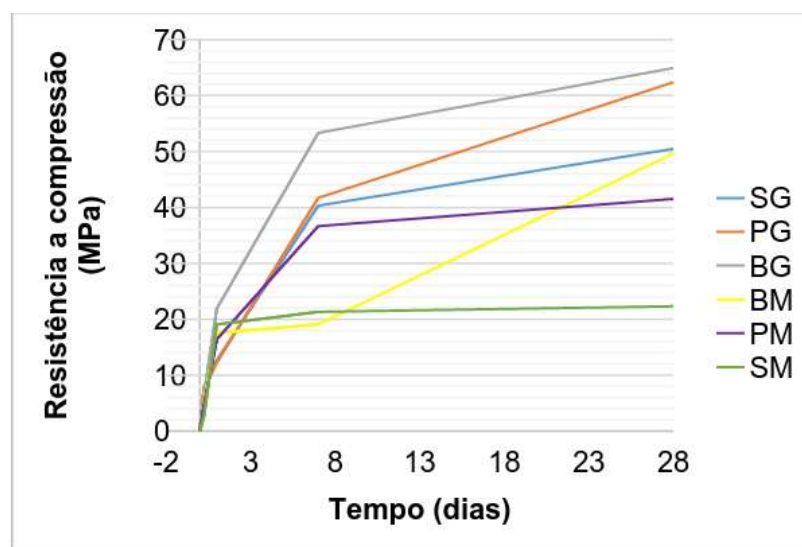


Figura 3.14 - Resistência à compressão dos corpos de prova em função do tempo.
Fonte: Gonçalves (2016).

Deb *et al.*, (2014) analisaram o efeito da escória de alto forno adicionada em diferentes proporções e com diversos teores de solução ativadora, na trabalhabilidade e nas propriedades de resistência do concreto geopolimérico produzido com cinzas volantes. Nesse estudo os autores atingiram uma resistência à compressão máxima de 54 MPa com uma idade de 28 dias, um conteúdo de 20% de escória de alto forno, 80% de cinzas

volantes e 40% de solução ativadora com uma relação de hidróxido de sódio e silicato de sódio de 1,5 e uma temperatura de cura de 20°C. Foi observado que todas as misturas de concreto geopolimérico mostraram um incremento de resistência à compressão quando o conteúdo de escória de alto forno era maior (20%) e a relação de hidróxido de sódio e silicato de sódio era baixa (1,5). Em algumas das misturas foi adicionada água, o que influenciou significativamente a resistência à compressão do concreto geopolimérico, diminuindo o desempenho.

3.2.3.2 Resistência à tração.

CASTEL & FOSTER (2015) estudaram a aderência entre o concreto geopolimérico e as barras lisas e nervuradas utilizando os ensaios padronizados do RILEM (*Pull-out*). O objetivo do estudo foi avaliar a resistência à aderência entre o aço e o concreto geopolimérico utilizando como variáveis o tempo de cura (24 horas e 28 dias após a concretagem) e as condições de cura dos modelos.

Foram projetadas duas condições de cura para os testes, o primeiro plano de cura foi denominado 2D, no qual os corpos de prova após a confecção, foram armazenados num forno com uma temperatura constante de 80°C por um tempo de 24 horas. Seguido isto, mergulharam-se os modelos em água com temperatura constante de 80°C por um tempo de 24 horas. Para culminar os 28 dias, os corpos de prova foram guardados num quarto com temperatura constante de 23°C e com umidade relativa de 65%. A segunda condição de cura foi denominada 7D, após a confecção, os corpos de prova armazenaram-se num forno por um tempo de 24 horas a uma temperatura constante de 40°C, depois disto, foram mergulhados em água a uma temperatura constante de 80°C por um tempo de 7 dias. Para completar os 28 dias, os corpos de prova guardaram-se num quarto com temperatura constante de 23°C e com umidade relativa de 65%.

Na confecção da pasta geopolimérica foram utilizadas cinzas volantes, cinzas de metacaulim de alto desempenho e escória granulada de alto forno. A solução alcalina foi elaborada com uma mistura de 12 molar (M) de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂O). Os autores atingiram uma resistência à tração de 4,5 MPa aos 28 dias dos corpos de prova com a condição de cura denominada 7D.

Sing *et al.* (2013) estudaram o comportamento do cisalhamento das vigas de concreto geopolimérico reforçado com fibras de aço. Foram utilizados reforços end-hooked e fibras de aço retas adicionadas em diferentes proporções (0 a 15%). Na fabricação do concreto geopolimérico utilizou-se areia, agregado com um tamanho de 10 milímetros, cinzas volantes, escória de alto forno, cinzas e caulinita de alto desempenho. A solução alcalina foi de 12 molar de hidróxido de sódio e silicato de sódio em solução. Os autores concluíram que a quantidade e o tipo de fibras adicionadas ao concreto, tiveram uma influência significativa na taxa de crescimento das fissuras e no tamanho das mesmas. Foi atingido um valor máximo de tensão à tração de 3,3 MPa.

Islam *et al.*, (2013) evidenciou o incremento na resistência do concreto à tração com o incremento das idades dos corpos de prova. Os resultados mostraram que a resistência à tração era alta nos corpos de prova com alto conteúdo de escória e baixa relação SS/SH em todas as amostras testadas. A resistência à tração foi afetada pela adição de água, teve o mesmo efeito que se evidenciou na resistência à compressão. Os autores atingiram uma resistência à tração aos 20 dias de 4,81 MPa, para uma mistura de 20 % de escória de alto forno, uma relação de silicato de sódio a hidróxido de sódio de 1.5.

3.2.3.3 Módulo de Elasticidade.

CASTEL & FOSTER (2015) determinaram um valor de módulo de elasticidade de 25 GPa após um dia de fabricado o concreto, evidenciando que o calor no processo de cura não influenciou significativamente os resultados do módulo de elasticidade ao longo dos dias. Em relação ao aumento do processo de cura de dois dias a sete dias, os modelos apresentaram um leve incremento nos valores de módulo de elasticidade. Na Figura 3.15 é apresentado o gráfico do incremento do módulo de elasticidade *versus* tempo de cura obtido na pesquisa de CASTEL & FOSTER (2015).

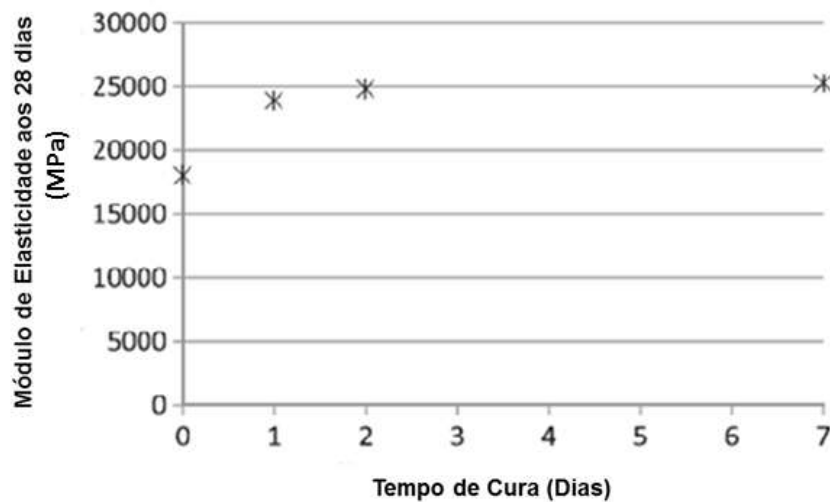


Figura 3.15 - Incremento do módulo de elasticidade versus tempo de cura.
Fonte: CASTEL & FOSTER (2015).

Sing *et al.* (2013) obtiveram valores de módulo de elasticidade de 25.8 Mpa, este valor foi obtido na viga que não tinha nenhuma adição de fibras de aço.

3.2.3.4 Resistência ao Fogo.

T.W Cheng; J.P. Chiu, (2003) estudaram o uso da escória de alto forno na elaboração de geopolímeros. Os autores encontraram uma relação entre a resistência ao fogo com a concentração de hidróxido de potássio, do metacaulim e da adição de silicato de sódio

no geopolímero. Foram feitos painéis com diferentes porcentagens de hidróxido de potássio, de metacaulim e de silicato de sódio, cada um com 10 milímetros de espessura e expostos a uma chama de 1000 °C. As temperaturas foram medidas do lado reverso do painel. Os autores concluíram que com o aumento da adição de hidróxido de potássio e de metacaulim, a resistência de isolamento ao fogo dos painéis melhorava significativamente; mas esse fenômeno não foi apresentado com a adição de silicato de sódio. As temperaturas obtidas após de 35 minutos do início da aplicação da flama foram de 350 °C. Na Figura 3.16 são apresentados os resultados obtidos na pesquisa de T.W Cheng; J.P. Chiu, (2003).

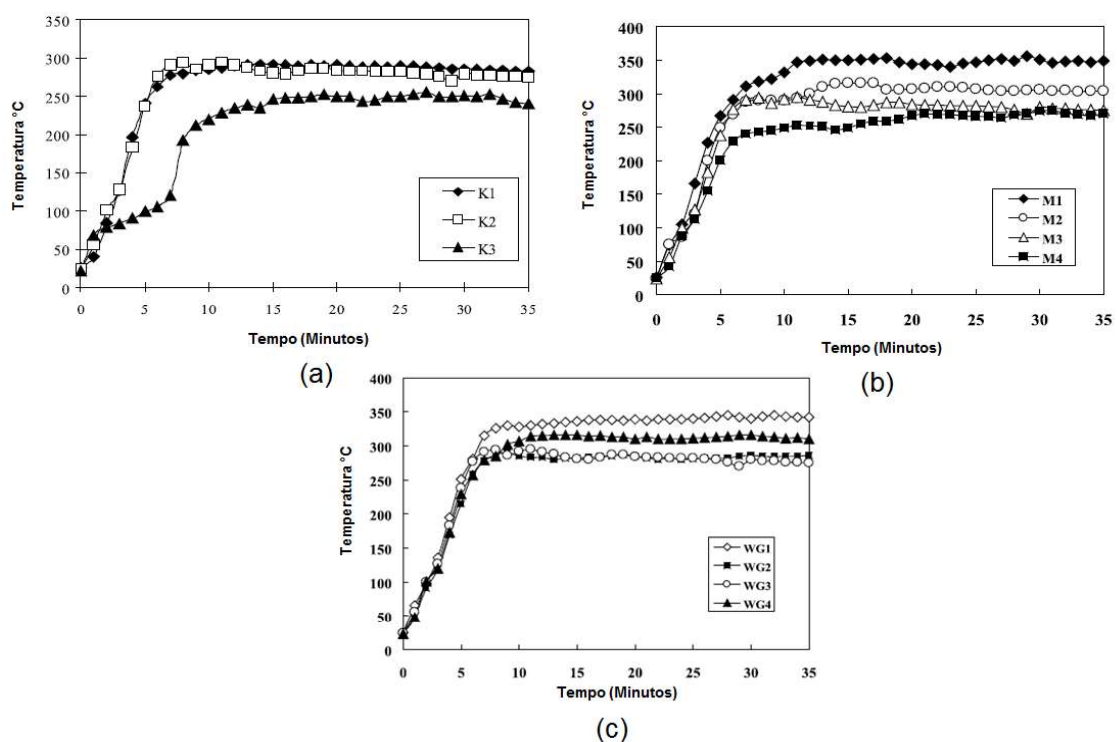


Figura 3.16 - Gráficos temperatura versus tempo: a) Geopolímero com diferentes adições de KOH; b) Geopolímero com diferentes adições de metacaulim; c) Geopolímero com diferentes adições de silicato de sódio.

Fonte: T.W Cheng; J.P. Chiu, (2003).

LUNA-GALIANO *et al.* (2015) estudaram o efeito das altas temperaturas nas pastas geopoliméricas compostas de cinzas volantes, metacaulim e silicato de sódio. Foi feito um estudo comparativo de três painéis, com o objetivo de determinar a possibilidade da

utilização das cinzas volantes em pastas geopoliméricas como isolantes térmicos. Um painel composto com cinzas volantes, um segundo painel elaborado com cinzas volantes e metacaulim e o último composto de cimento Portland. Os painéis tinham uma espessura de 2 centímetros, uma altura de 28 centímetros e uma largura de 18 centímetros. Após 24 da elaboração dos painéis, foram desmoldados e submetidos a um processo de cura por um tempo de 28 dias expostos a 20°C com umidade relativa de 45 %. Os painéis submeteram-se a diferentes temperaturas (300°C, 500°C e 700°C) por um tempo aproximado de três horas. Do estudo, os autores concluíram que o geopolímero composto de cinzas volantes e metacaulim apresentou um decréscimo de 50% na resistência à compressão quando comparado com o geopolímero composto de cinzas volantes. A Figura 3.17 apresenta o gráfico temperatura *versus* tempo dos painéis estudados.

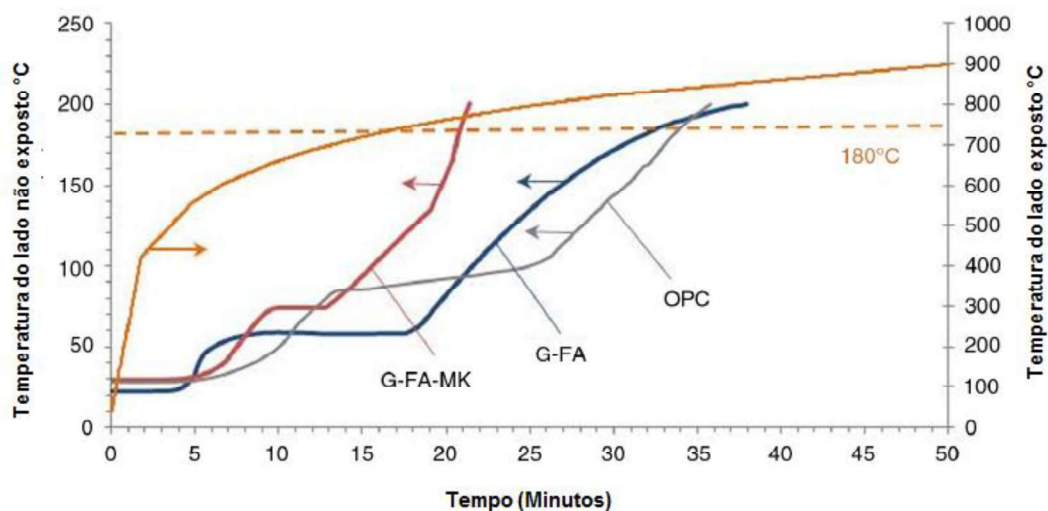


Figura 3.17 - Gráficos temperatura versus tempo.
 Fonte: LUNA-GALIANO et al. (2015).

A diferença entre os painéis de composto geopolimérico é dada pela baixa densidade, baixa absorção de água e alta porosidade do painel com cinzas volantes e metacaulim. Na Figura 1.6 é evidente a mudança da inclinação após atingir o patamar de evaporação dos painéis de cinza volante com metacaulim (G-FA-MK) e o de cimento Portland (OPC); o painel de cinzas volantes (G-FA) apresenta um incremento mais suave. Em relação à

perda de massa, o painel que apresentou menor perda de massa, foi o composto por cinzas volantes e metacaulim; devido que, a capacidade de absorção de água é menor no rango dos 50°C a 200°C; o painel de cimento Portland apresentou uma alta perda de massa, foi de 20% aproximadamente. Os autores concluíram que a resistência ao fogo é maior nos painéis compostos com cinzas volantes, e similar ao comportamento dos painéis de cimento Portland.

3.2.3.5 Aderência.

Bell. J, *et al.* (2005) estudaram a adesão do cimento geopolimérico em aço, alumínio e vidro. Eles fizeram uma pasta de cimento geopolimérico com uma relação de silicato de potássio e metacaulim de 2,21:1 (relação escolhida para dar um melhor resultado na força de adesão do geopolímero). Após a mistura, a pasta foi aplicada às respectivas amostras com um tempo de cura de 36 horas e uma temperatura de 50°C. Os procedimentos de limpeza das amostras de aço, vidro e alumínio foram realizados de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Especificação e procedimento de limpeza utilizado no aço, vidro e alumínio.
Fonte: Bell. J, et al. (2005).

Material Testado	Fornecedor	Espessura da Chapa (in)	Chapa Simples	Chapa Dupla	Procedimento de Limpeza
1008/1010 Aço	McMaster Carr	0.062	SIM	SIM	ASTM D2651
6061-T6 (Liga de alumínio)	McMaster Carr	0.0625	SIM	NÃO	ASTM D2652
Alumina	3M	0.032	NÃO	NÃO	Detergente (70% ácido sulfúrico) e água (30%)

Após a limpeza da superfície, o geopolímero foi aplicado por imersão para garantir a distribuição adequada do material. Depois as amostras foram inseridas dentro do forno de cura. A força de cisalhamento foi calculada com dados obtidos de várias amostras

de acordo com a normatização do teste de sobreposição da ASTM D1002-01(Simples) e ASTM D3528-96 (duplo). Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos testes de cisalhamento.
Fonte: Bell. J, et al. (2005).

Material Testado	Média máxima resistência ao cisalhamento (MPa)		
	Amostra após calor	Chapa Simples (Teste D1002-01)	Chapa Dupla (Teste D3528-96)
1008/1010 Aço	RT	3.12	3.79
	450°C	-	3.45
6061-T6 (Liga de alumínio)	RT	0.81	-
Vidro de Borossilicato	RT	1.27	1.91
	450°C	3.4	2.05

Os resultados dos testes indicam que a força de adesão entre o aço e o geopolímero é de aproximadamente 3 a 4 MPa. Verificaram também que a força de cisalhamento foi relativamente baixa 2 a 3 MPa. Embora a força de cisalhamento entre o geopolímero e o aço não seja particularmente alta, os autores concluíram que a estrutura do material composta de aço - geopolímero pode ser utilizada para reforços estruturais (em vergalhões) e como cimento para o concreto (cimento estrutural).

No estudo feito por CASTEL e FOSTER (2015) concluiu-se que o desempenho da tensão da aderência do concreto geopolimérico, depende em grande parte da resistência à tração dele. Os autores encontraram que as características mecânicas e de tensão de aderência do concreto geopolimérico elaborado com cinzas volantes depende das condições de cura, devido que, com um intenso calor de cura, a aderência em idades tempranas é melhor no concreto geopolimérico que no concreto convencional. Concluíram também que a adesão química do concreto geopolimérico com a superfície das barras lisas, é similar à observada no concreto convencional. A

Figura 3.18 apresenta o gráfico tensão de aderência *versus* deslizamento das barras nervuradas estudadas por CASTEL & FOSTER (2015).

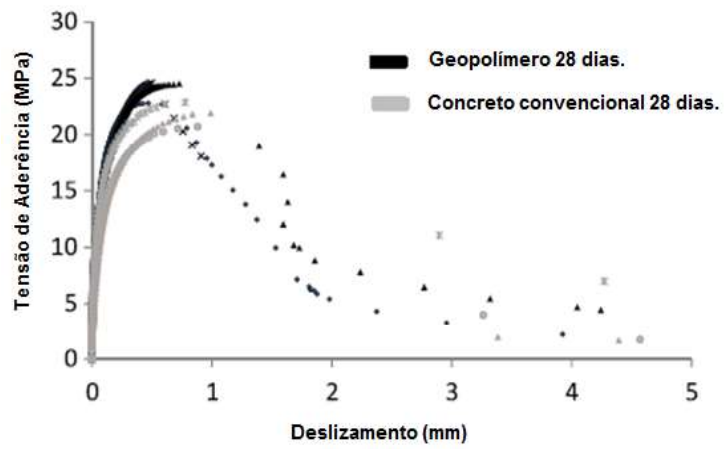


Figura 3.18 - Gráfico tensão de aderência versus deslizamento.
Fonte: CASTEL & FOSTER (2015).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise da aderência de perfis tubulares preenchidos com concreto geopolimérico foi realizada experimentalmente nesta pesquisa por meio da comparação com o desempenho de perfis preenchidos com concreto convencional. A avaliação realizou-se com base no ensaio experimental de cisalhamento direto (*push-out*). Foi realizada uma etapa de ensaios a fim de verificar a viabilidade da experimentação proposta. Depois de realizados os testes preliminares foram definidas as dimensões das seções transversais e o comprimento dos modelos. Após o preenchimento dos perfis e a cura do concreto, foram realizados os ensaios de cisalhamento direto (*push-out*). A caracterização dos materiais realizou-se no Laboratório de Raios X do Departamento de Engenharia Metalúrgica, no Laboratório de Engenharia de Polímeros e Compósitos do Departamento de Metalurgia da Universidade Federal de Minas Gerais e no Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais. Os ensaios de cisalhamento direto (*push-out*) foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG. Os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão dos concretos, foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais e no Laboratório de Concreto do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais. O fluxograma apresentado na Figura 4.1 ilustra a metodologia proposta.

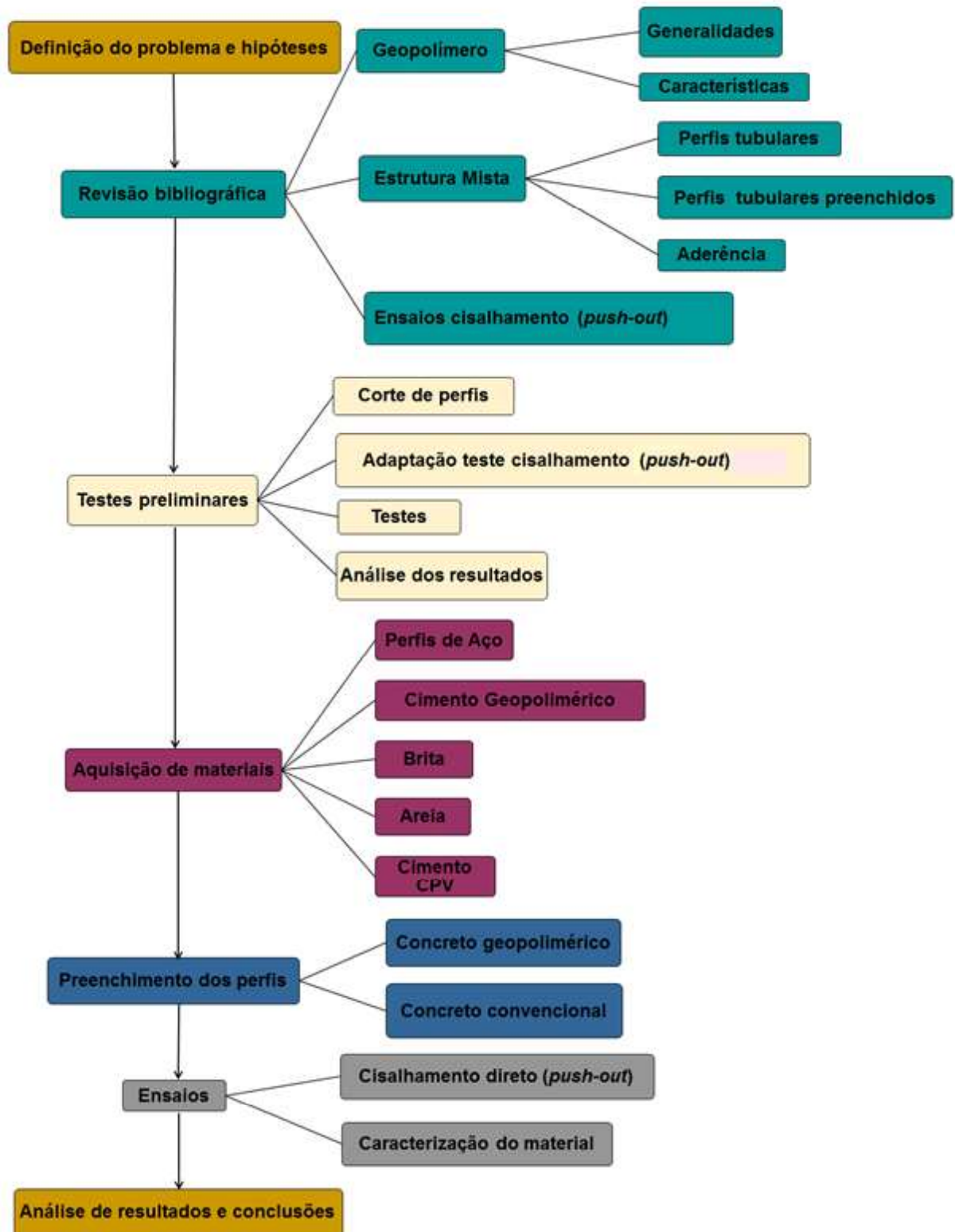


Figura 4.1 - Fluxograma do projeto.

Fonte: Autor.

4.1 Materiais

Nas diferentes etapas do projeto foram utilizados perfis estruturais tubulares de seções comerciais quadradas, retangulares e circulares. Nos testes preliminares utilizou-se perfis preenchidos com concreto auto adensável. Na segunda etapa desta pesquisa, um grupo de perfis tubulares foram preenchidos com concreto geopolimérico fornecido pela empresa Wincret Design Concrete Products LTDA e outro grupo foi preenchido com concreto convencional.

Os perfis e o concreto utilizados foram de duas naturezas. Na primeira etapa, para a elaboração dos testes preliminares, foram utilizados perfis tubulares remanescentes da pesquisa de Campolina (2008). Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas as características físicas e geométricas nominais dos perfis de aço e o traço de concreto utilizados para a construção dos corpos de prova ensaiados por Campolina (2008).

Tabela 3 - Características dos perfis utilizados nos ensaios preliminares.
Fonte: Campolina (2008).

Tipo de Seção	Quadrado	Retangular	Circular
Dimensões (mm)	100x100	120x80	114,3
Espessura (mm)	6,4	4,4	6,4
Comprimento (mm)	800	800	800
Material	Aço Patinável	Aço Patinável	Aço Patinável
Especificação do Aço	VMB 350 cor	VMB 350 cor	VMB 350 cor
f_y (MPa)	> 350	> 350	> 350
f_u (MPa)	≥ 485	≥ 485	≥ 485

Na Tabela 3, f_y é a resistência ao escoamento do aço e f_u é a resistência à ruptura do aço na tração.

Tabela 4 - Traço do concreto auto adensável.
Fonte: Campolina (2008).

Materiais	Quantidade para 1 m³
DURACEM AD 300 HOLCIM	420 kg
Areia Natural Irineu	397 kg
Areia Artificial Ical	604 kg
Brita 0 Gnaisse	779 kg
ADITIVO TEC MULT 562	3356 ml
ADITIVO GLENIUM 3010	3776 ml
Água Potável	189 L

Na segunda etapa do trabalho, foram utilizados perfis tubulares estruturais de características similares aos utilizados nos testes preliminares. A Figura 4.2 mostra os perfis utilizados na segunda etapa deste projeto. Na Tabela 5 são apresentadas as características físicas e geométricas nominais dos perfis de aço. Na confecção do concreto geopolimérico, inicialmente programou-se o preenchimento dos perfis tubulares na mesma data; no entanto, ocorreram imprevistos na concretagem e não foi possível preencher a totalidade dos perfis. Neste contexto, foram confeccionados dois tipos de concreto geopolimérico denominados de geopoliméricos I e II. A Figura 4.3 apresenta os materiais fornecidos pela Wincret Designer Concrete Products LTDA. As Tabelas 6 e 7 apresentam as proporções utilizadas na fabricação dos concretos geopoliméricos. O traço utilizado no concreto convencional é apresentado na Tabela 8.



Figura 4.2 - Perfis tubulares utilizados na segunda etapa.

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Características dos perfis utilizados na segunda etapa.

Fonte: Autor.

Tipo de Seção	Quadrado	Retangular	Circular
Dimensões (mm)	110x110	200x100	101
Espessura (mm)	4,0	6,4	4,5
Comprimento (mm)	500	500	500
Material	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono



(a)



(b)

Figura 4.3 - Material fornecido pela Wincret Designer Concrete Products LTDA: a) precursor; b) ativador.

Fonte: Autor.

Tabela 6 - Proporções dos materiais constituintes do concreto geopolimérico I.

Fonte: Autor.

Materiais	Quantidade (kg)
Ativador	33,8
Precursor	46,76
Areia	108
Brita	162

Tabela 7 - Proporções dos materiais constituintes do concreto geopolimérico II.

Fonte: Autor.

Materiais	Quantidade (kg)
Ativador	34,6
Precursor	24,34
Areia	34,89
Brita	52,34

Tabela 8 - Traço para 1 m³ de concreto convencional.

Fonte: Autor.

Materiais	Quantidade (kg)
Água	211,19
Cimento	305,60
Areia	769,62
Brita	822,30

Na confecção do concreto foi utilizada brita zero de tipo calcária, cuja análise granulométrica encontra-se no Anexo 8.1. A areia utilizada na fabricação do concreto foi areia fina, cuja análise granulométrica encontra-se no Anexo 8.2. O cimento usado na confecção do concreto convencional foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV – ARI) da empresa Holcim S.A.

4.2 Métodos

Definido o problema e concluída a parte inicial da revisão bibliográfica, foram realizados na primeira etapa do trabalho testes preliminares a fim de se verificar a viabilidade da experimentação proposta. Esta metodologia considera a análise de perfis tubulares preenchidos com comprimento reduzido. Na segunda parte do trabalho foram avaliados comparativamente perfis tubulares preenchidos com concreto convencional e perfis tubulares preenchidos com concreto geopolimérico.

4.2.1 Testes preliminares

Na presente pesquisa, os ensaios foram realizados em corpos de prova constituídos por perfis tubulares de aço preenchidos com concreto confeccionados durante a pesquisa

de Campolina (2008). Foram testadas três séries de corpos de prova, sendo uma série com corpos de prova com 150 mm de comprimento, outra com 250 mm de comprimento e outra com 350 mm de comprimento. Em cada série foi considerado um corpo com seção transversal quadrada, outro com seção transversal retangular e outro com seção transversal circular, totalizando nove corpos de prova.

De acordo com o que informa Campolina (2008), após a definição das seções transversais dos tubos de aço dos corpos de prova que seriam ensaiados em sua pesquisa, o procedimento experimental se iniciou pela formação da oxidação nas paredes internas dos tubos (pátina). Em seguida, foi desenvolvido o traço e confeccionado o concreto de alta resistência e auto adensável. Com esse concreto foi feito o preenchimento dos perfis tubulares para que, após a cura do concreto, os corpos de prova fossem submetidos a ensaios de cisalhamento direto (do tipo de *push out*). Foram escolhidos perfis tubulares com costura e sem costura de geometrias diferentes (quadrada, retangular e circular). A opção da escolha se deu em função da semelhança entre os perfis de diferentes formas da seção transversal no tocante às dimensões das áreas internas, às espessuras de parede, aos comprimentos das amostras, ao tipo e resistência ao escoamento do aço.

O método utilizado para acelerar a formação da pátina consistiu da aplicação de solução corrosiva, à base de percloroeto de ferro, para ativar o processo oxidante. O sal FeCl_3 é também conhecido como cloreto de ferro III.

O traço do concreto foi projetado para atender às características de auto adensável e para altas resistências à compressão. Aos 41 dias esse concreto apresentou uma resistência à compressão média de 62,69 MPa e um valor médio de módulo de

elasticidade de 39,20 GPa; com essas características, não foi necessário vibrar o concreto no interior dos tubos de aço.

Os corpos de prova utilizados apresentam um diferencial em relação ao efeito da idade do concreto e da corrosão do perfil tubular de aço, quando comparados com os modelos empregados na pesquisa de Campolina (2008). O concreto dos corpos de prova que foram testados na fase preliminar da presente pesquisa apresentam uma idade aproximada de nove (9) anos. Este é o mesmo tempo que se passou após a formação da oxidação nas paredes internas dos tubos (pátina).

Visando à execução dos ensaios de verificação do deslizamento do núcleo de concreto no interior dos tubos de aço, os nove corpos de prova ensaiados na presente pesquisa foram obtidos a partir de cortes executados em corpos de prova remanescentes da pesquisa de Campolina (2008), e que não haviam sido ensaiados. Esses corpos de prova tinham comprimentos iguais a 800 mm, sendo 750 mm preenchidos com concreto e 50 mm sem o preenchimento para que o deslizamento do concreto pudesse ocorrer. De cada um desses corpos de prova, foram retirados três outros corpos de prova com comprimentos de 150 mm, 250 mm e 350 mm, com a intenção de verificar a influência do comprimento do corpo de prova na tensão de aderência.

Em todos os corpos de prova ensaiados na presente pesquisa, os tubos foram fabricados com costura e com a formação da oxidação (pátina) em seu interior.

Em dois ensaios foram utilizados um atuador hidráulico Enerpac com capacidade de 500kN, um anel dinamométrico com capacidade de 500 kN e seu relógio comparador, um transdutor de pressão na linha hidráulica do atuador, placas de base e esfera de aço (para composição da rótula espacial) e um transdutor de deslocamento com capacidade

de leitura de 100 mm para registrar o deslizamento relativo entre o núcleo de concreto e os perfis tubulares. Durante os testes, foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca Lynx para o registro do tempo de duração de cada ensaio, do carregamento imposto e do deslizamento do concreto no interior dos tubos. Nestes casos, a aplicação de carga era feita em aproximadamente vinte (20) passos de carga, até ser alcançado um deslizamento de aproximadamente 30 mm entre o concreto e o aço.

Em sete ensaios foi utilizado para aplicação de carga o Sistema MTS, constituído de um atuador hidráulico servo-controlado com capacidade de 1500 kN, com controle digital por computador, que permite a aplicação de forças por controle de força ou de deslocamento do cilindro do atuador, sendo este último o utilizado durante os ensaios. Nos ensaios, foi também empregado o sistema Lynx de aquisição de dados, neste caso para gravar em tempo real somente os sinais do deslizamento relativo entre o aço e o concreto, o que foi feito com um transdutor de deslocamento com capacidade de leitura de 30 mm. Neste caso, a aplicação de carga era feita de modo contínuo, até ser alcançado um deslocamento de aproximadamente 28 mm entre o concreto e o aço.

Na Figura 4.4 apresenta-se o esquema utilizado para a aplicação da força no núcleo do concreto, tal como foi utilizado por Campolina (2008) como parte da metodologia de ensaios de deslizamento do tipo push-out.

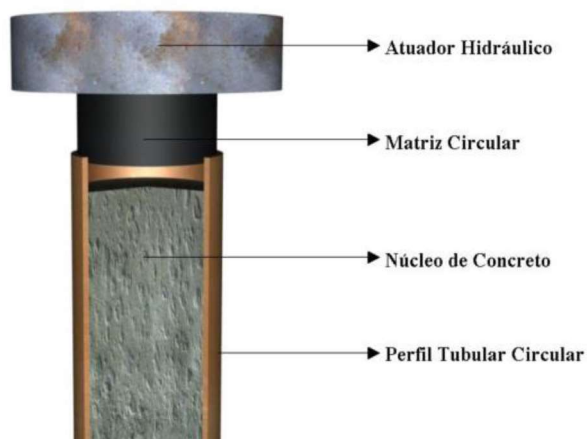


Figura 4.4 - Esquema do ensaio de deslizamento do pilar misto circular.
Fonte: CAMPOLINA (2008).

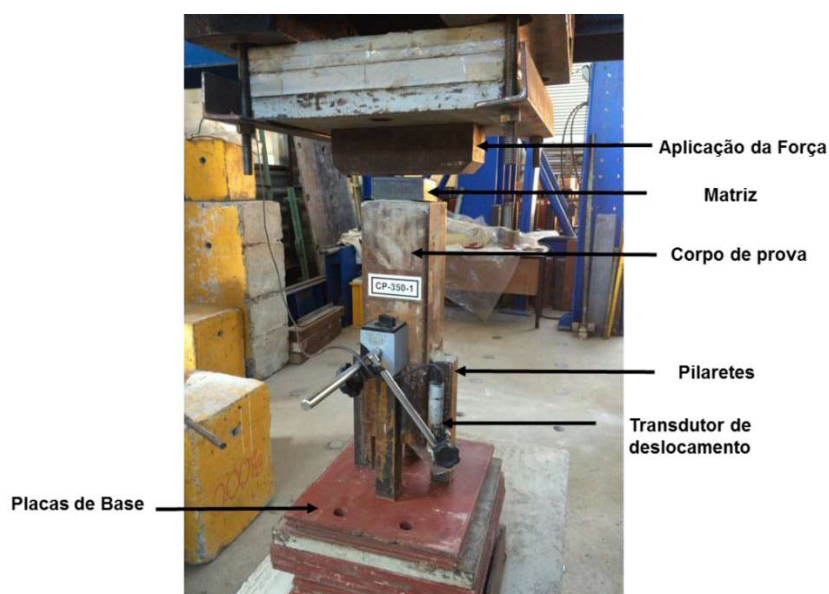


Figura 4.5 - Esquema ensaio utilizado.
Fonte: Autor.

Para executar os ensaios de deslizamento, foi necessário que os corpos de prova apresentassem um espaço de no mínimo cinco centímetros entre a placa de base e a superfície inferior do núcleo de concreto (que se encontrava no mesmo plano da seção inferior do tubo de aço). Conforme mostra a Figura 4.5, isto foi possível com a execução de quatro pilaretes de aço na parte inferior do corpo de prova. Esses pilaretes, de seção quadrada com lado de 30 mm, foram soldados ao tubo de aço, tendo sido uma adaptação necessária à realização dos ensaios.

Na Tabela 3 apresentaram-se as características físicas e geométricas nominais dos perfis tubulares que foram utilizados para a construção dos corpos de prova ensaiados por Campolina (2008) e nos testes preliminares deste projeto. Para o preenchimento dos tubos foi utilizado um concreto auto adensável, dosagem é apresentada na Tabela 4.

Foram testadas três séries de corpos de prova. A série 1 estava constituída por corpos de prova com 150 mm de comprimento; a série 2 por corpos de prova com 250 mm de comprimento e a série 3 por corpos de prova com 350 mm de comprimento. Em cada série foi considerado um corpo com seção quadrada, outro com seção retangular e outro com seção circular, totalizando nove corpos de prova, conforme consta na Tabela 9, com a simbologia CP se referindo a corpo de prova, o número 150, 250 ou 350 faz referência ao valor do comprimento do perfil. O último número se refere ao tipo de seção transversal do perfil, um para os perfis de seção transversal quadrada, dois para os perfis de seção transversal circular e o três para os perfis de seção transversal retangular.

Tabela 9 - Dimensões e classificação das séries dos corpos de prova, com as dimensões médias medidas.

Fonte: Autor.

Série	Tipo de Seção	Corpo de Prova	Características
1	Seção quadrada	CP-150-1	Lado: 101,6 mm.
			Espessura da chapa: 6,4 mm.
			Comprimento: 150mm.
	Seção circular	CP-150-2	Diâmetro: 114,3 mm.
			Espessura da chapa: 6,4 mm.
			Comprimento: 150 mm.
	Seção retangular	CP-150-3	Lado 1: 76,2 mm.
			Lado 2: 127 mm.
			Espessura da chapa: 4 mm.
Comprimento: 150mm.			
2	Seção quadrada	CP-150-1	Lado: 101,6 mm.
			Espessura da chapa: 6,4 mm.
			Comprimento: 250mm.
	Seção circular	CP-250-2	Diâmetro: 114,3 mm.
			Espessura da chapa: 6,4 mm.
			Comprimento: 250 mm.
	Seção retangular	CP-250-3	Lado 1: 76,2 mm.
			Lado 2: 127 mm.
			Espessura da chapa: 4 mm.
Comprimento: 250mm.			
3	Seção quadrada	CP-150-1	Lado: 101,6 mm.
			Espessura da chapa: 6,4 mm.
			Comprimento: 350mm.
	Seção circular	CP-350-2	Diâmetro: 114,3 mm.
			Espessura da chapa: 6,4 mm.
			Comprimento: 350 mm.
	Seção retangular	CP-350-3	Lado 1: 76,2 mm.
			Lado 2: 127 mm.
			Espessura da chapa: 4 mm.
Comprimento: 350mm.			

Na Tabela 9, as medidas de dois lados perpendiculares entre si e representativos do quadrado e do retângulo foram consideradas como a média de quatro medidas efetuadas nas duas seções de extremidade do tubo de aço. Para o tubo circular o diâmetro médio foi determinado como a média de quatro medidas do diâmetro realizadas em uma de suas seções de extremidade. A espessura foi determinada como a média de quatro medidas efetuadas nas duas seções de extremidade do tubo de aço. O comprimento foi determinado como a média de quatro medidas efetuadas, uma em

cada dobra do quadrado e do retângulo e, nos tubos circulares, o comprimento foi determinado como a média de quatro medidas feitas diametralmente opostas no tubo de aço.

4.2.2 Aquisição de materiais

Uma vez analisados os resultados dos testes preliminares definiram-se as dimensões das seções transversais e a altura dos demais modelos a serem testados nesta pesquisa. Como consequência, foi necessária a reavaliação das dimensões das seções transversais dos perfis. Os perfis tubulares de aço foram obtidos por meio da empresa Califer Comércio de Ferro e Aço LTDA.

Devido à atuação da tensão de confinamento nos perfis tubulares preenchidos, e aos resultados obtidos nos ensaios preliminares, decidiu-se gerar um corte longitudinal em alguns dos perfis de seção retangular para avaliar a influência desta liberação de tensões e o efeito no confinamento do concreto.

No total, foram ensaiados 18 corpos de prova, dos quais nove foram preenchidos com concreto geopolimérico e nove com concreto convencional. Na Tabela 10 são apresentadas as características dos corpos de prova preenchidos com o concreto denominado concreto geopolimérico I. A Tabela 11 apresenta as características dos corpos de prova preenchidos com o denominado concreto geopolimérico II. A Tabela 12 apresenta as características dos perfis preenchidos com o concreto convencional. A simbologia G1 se refere ao concreto geopolimérico denominado I, G2 ao concreto geopolimérico denominado II e C ao concreto convencional. A segunda letra faz referência ao tipo de seção transversal do perfil R para perfis de seção retangular, Q para perfis de seção quadrada e C para perfis com seção circular. A denominação SC se refere aos perfis que não apresentam corte longitudinal e C para os perfis com corte longitudinal.

Tabela 10 - Dimensões dos corpos de prova preenchidos com o concreto geopolimérico I.
Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Tipo de Seção	Características	
G1-RSC1	Retangular	Lado 1: 85,80 mm.	Sem corte longitudinal
		Lado 2: 186 mm.	
		Espessura do tubo: 6,4 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
G1-RSC2	Retangular	Lado 1: 85,97 mm.	Sem corte longitudinal
		Lado 2: 186 mm.	
		Espessura do tubo: 6,4 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
G1-RC1	Retangular	Lado 1: 85,78 mm.	Com corte longitudinal
		Lado 2: 185,50 mm.	
		Espessura do tubo: 6,4 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
G1-RC2	Retangular	Lado 1: 85,74 mm.	Com corte longitudinal
		Lado 2: 186,20 mm.	
		Espessura do tubo: 6,4 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	

Tabela 11 - Dimensões dos corpos de prova preenchidos com o concreto geopolimérico II.
Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Tipo de Seção	Características	
G2-CSC1	Circular	Diâmetro: 94,28 mm.	Sem corte longitudinal
		Espessura da chapa: 4,5mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
G2-CSC2	Circular	Diâmetro: 92,41 mm.	Sem corte longitudinal
		Espessura da chapa: 4,5 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
G2-QSC1	Quadrado	Lado 1: 102,22 mm.	Sem corte longitudinal
		Espessura da chapa: 4,0 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
G2-QSC2	Quadrado	Lado 1: 102,66 mm.	Sem corte longitudinal
		Espessura da chapa: 4,0 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	

Tabela 12 - Dimensões dos corpos de prova preenchidos com o concreto convencional.
Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Tipo de Seção	Características	
C-RSC1	Retangular	Lado 1: 86,00 mm.	Sem corte longitudinal
		Lado 2: 186 mm.	
		Espessura da chapa: 6,4 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
C-RSC2	Retangular	Lado 1: 86,00 mm.	Sem corte longitudinal
		Lado 2: 186,2 mm.	
		Espessura da chapa: 6,4 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
C-RC1	Retangular	Lado 1: 85,85 mm.	Com corte longitudinal
		Lado 2: 186,0 mm.	
		Espessura da chapa: 6,4 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
C-RC2	Retangular	Lado 1: 85,75 mm.	Com corte longitudinal
		Lado 2: 186,20 mm.	
		Espessura da chapa: 6,4 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
C-QSC1	Quadrado	Lado 1: 102,36 mm.	Sem corte longitudinal
		Espessura da chapa: 4,0 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
C-QSC2	Quadrado	Lado 1: 102,49 mm.	Sem corte longitudinal
		Espessura da chapa: 4,0 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
C-CSC1	Circular	Diâmetro: 95,56 mm.	Sem corte longitudinal
		Espessura da chapa: 4,5mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
C-CSC2	Circular	Diâmetro: 92,77 mm.	Sem corte longitudinal
		Espessura da chapa: 4,5 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	
C-CSC3	Circular	Diâmetro: 92,60 mm.	Sem corte longitudinal
		Espessura da chapa: 4,5 mm.	
		Comprimento: 500 mm.	

Após o recebimento dos perfis tubulares, foi aplicada uma solução de Cloreto de Ferro para a formação da oxidação interna. Transcorrida uma hora da aplicação da solução, os perfis foram lavados com água e posteriormente expostos ao meio ambiente. A Figura 4.6 apresenta o processo de aplicação da solução.

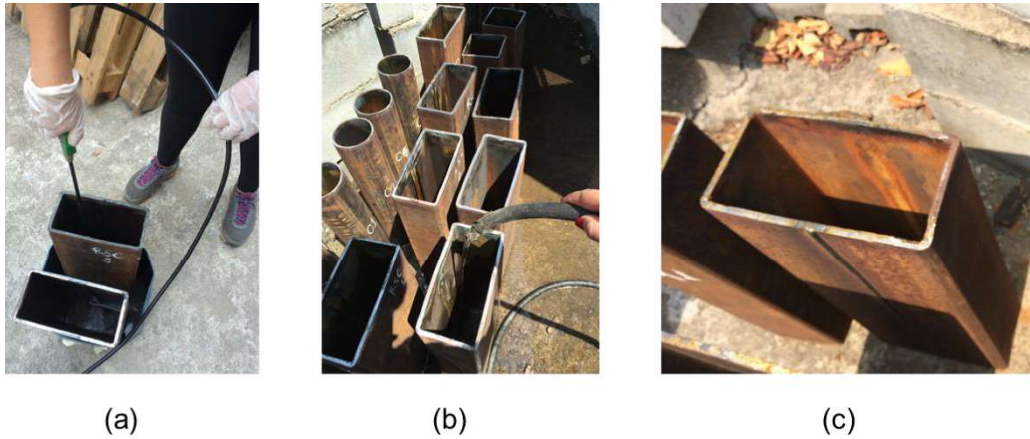


Figura 4.6 - Aplicação da solução de Cloreto de Ferro: a) aplicação; b) lavagem; c) concreto fabricado.
Fonte: Autor.

Definido o tipo de ativador e precursor a ser testado neste projeto e fornecido pela Wincret Designer Concrete Products LTDA, foi programada a concretagem dos perfis com concreto geopolimérico.

4.2.3 Preenchimento dos perfis tubulares

Visando à execução dos ensaios de cisalhamento direto (*push out*), o concreto não preencheu totalmente a altura dos perfis tubulares. Procurou-se que o concreto alcançasse uma altura máxima de 450 milímetros, reservando assim, 50 milímetros para o deslocamento relativo entre o núcleo de concreto e o perfil de aço. Isto foi garantido com o uso de uma placa de EPS com 50 milímetros de espessura, que era fixa no interior de uma das extremidades do tubo para posteriormente ser retirada antes dos ensaios.

Inicialmente programou-se o preenchimento dos perfis tubulares com concreto geopolimérico na mesma data. No entanto, os compósitos do precursor e o ativador, a temperatura e umidade do dia da concretagem, somado à quantidade de material disposto na betoneira, fizeram com que a mistura adquirisse um endurecimento acelerado (10 minutos aproximadamente), impossibilitando o preenchimento de todos

os perfis tubulares com concreto geopolimérico, denominado de concreto geopolimérico I. Devido a isto, foi necessário realizar uma segunda concretagem para o preenchimento dos perfis de seção transversal circular e quadrada. A Figura 4.7 mostra o processo de concretagem dos perfis com o concreto geopolimérico I.



Figura 4.7 - Concretagem dos perfis preenchidos com o concreto geopolimérico I: a) material utilizado; b) mistura; c) concreto fabricado.
Fonte: Autor.

O traço de concreto geopolimérico II foi elaborado para atender o preenchimento dos perfis tubulares remanescentes, devido que o primeiro concreto geopolimérico fabricado não apresentou a consistência desejada para o preenchimento dos perfis. Foi fornecido o material pela Wincret Designer Concrete Products LTDA com características similares às do primeiro traço, mas com uma quantidade de cálcio menor, para evitar o endurecimento acelerado. A Figura 4.8 apresenta a concretagem do concreto geopolimérico II.

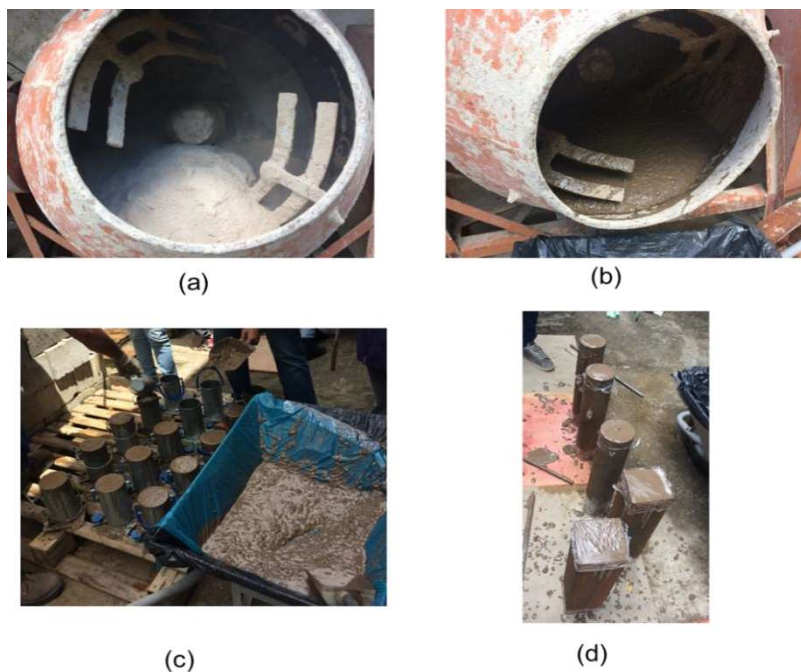


Figura 4.8 - Concretagem dos perfis preenchidos com o concreto geopolimérico II: a) material utilizado; b) mistura; c) confecção corpos de prova 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura; d) perfis preenchidos.

Fonte: Autor.

O traço do concreto convencional foi calculado para atingir uma resistência característica à compressão, f_{ck} , de 30 MPa. A fabricação do concreto foi realizada no mesmo dia, assim como o preenchimento dos perfis tubulares. Para verificação das características do concreto, foi executado o teste do *Slump* (Figura 4.9) resultando no valor de 11,5 milímetros para o abatimento do tronco de cone. A Figura 4.10 mostra o preenchimento dos perfis tubulares com concreto convencional.



Figura 4.9 - Verificação do Slump do concreto convencional.

Fonte: Autor.

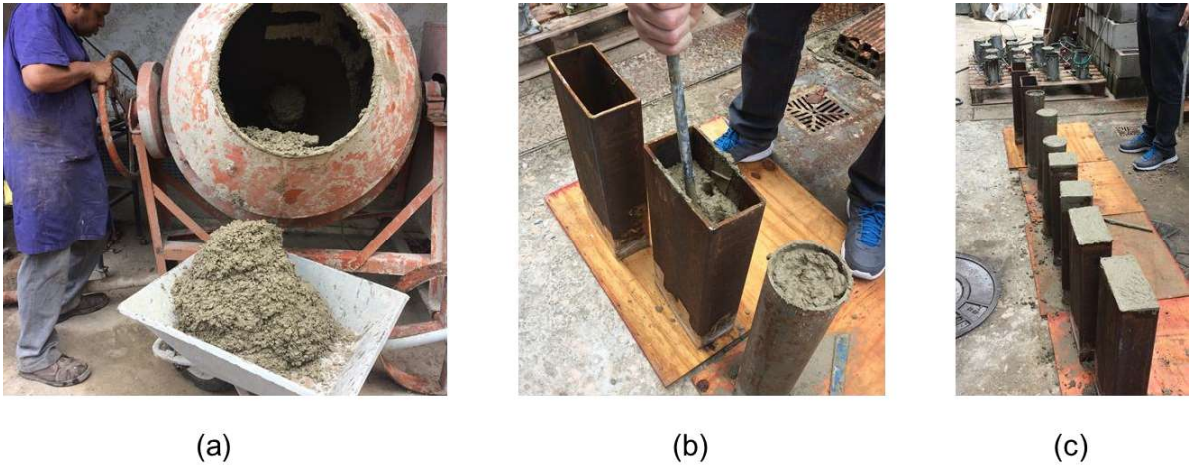


Figura 4.10 - Concretagem dos perfis preenchidos com o concreto convencional: a) mistura; b) preenchimento; c) perfis preenchidos.
Fonte: Autor.

Para cada concreto, foram moldados os respectivos corpos de prova cilíndricos de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura para a caracterização dos materiais (Figura 4.11). Foram fabricados, cinco corpos de prova para o concreto geopolimérico I, dezessete corpos de prova para o concreto geopolimérico II e vinte e um para o concreto convencional. O processo de cura dos corpos de prova cilíndricos dos três tipos de concreto foi efetuado à temperatura ambiente.

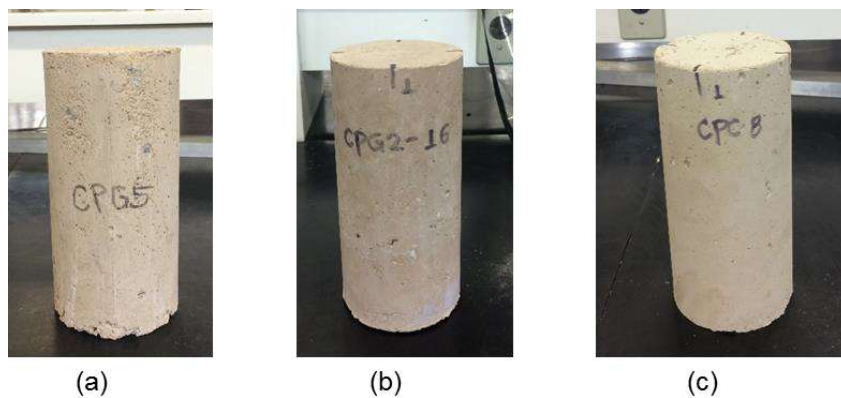


Figura 4.11 - Corpos de prova cilíndricos de 10 centímetros por 20 centímetros: a) concreto geopolimérico I; b) concreto geopolimérico II; c) concreto convencional. Fonte: Autor.

4.2.4 Ensaios

Foram realizados ensaios de módulo de elasticidade e de resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos com 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura. Foi executado o ensaio de cisalhamento direto (*push out*) nos perfis tubulares preenchidos. Para a caracterização da pasta que compõe o concreto geopolimérico II, foram realizadas as técnicas de difração de raios x (DRX), microscopia eletrônica por varredura (MEV) e de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).

4.2.4.1 Testes de cisalhamento direto

Em cinco ensaios foram utilizados um atuador hidráulico Enerpac com capacidade de 500kN, um anel dinamométrico com capacidade de 500 kN e seu relógio comparador, um transdutor de pressão na linha hidráulica do atuador, placas de base e esfera de aço (para composição da rótula espacial) e dois transdutores de deslocamento com capacidade de leitura de 100 mm para registrar o deslizamento relativo entre o núcleo de concreto e o perfil tubular. Durante os testes, foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca Lynx para o registro do tempo de duração de cada ensaio, do carregamento imposto e do deslizamento do concreto no interior do tubo. Nestes casos, a aplicação de carga era feita em aproximadamente cinco (5) passos de carga, até ser alcançado um deslizamento de aproximadamente 35 mm entre o concreto e o aço.

Em treze ensaios foram utilizados um atuador hidráulico TORVEL com capacidade de 2000 kN, um transdutor de pressão na linha hidráulica do atuador, placas de base e esfera de aço (para composição da rótula espacial) e dois transdutores de deslocamento com capacidade de leitura de 100 mm para registrar o deslizamento relativo entre o núcleo de concreto e o perfil tubular. Durante os testes, foi utilizado um sistema de

aquisição de dados da marca *Spider* para o registro do tempo de duração de cada ensaio, do carregamento imposto e do deslizamento do concreto no interior do tubo. Neste caso, a aplicação de carga era feita de modo contínuo, até ser alcançado um deslocamento de aproximadamente 35 mm entre o concreto e o aço. A Figura 4.12 apresenta o esquema utilizado nos ensaios de cisalhamento direto.

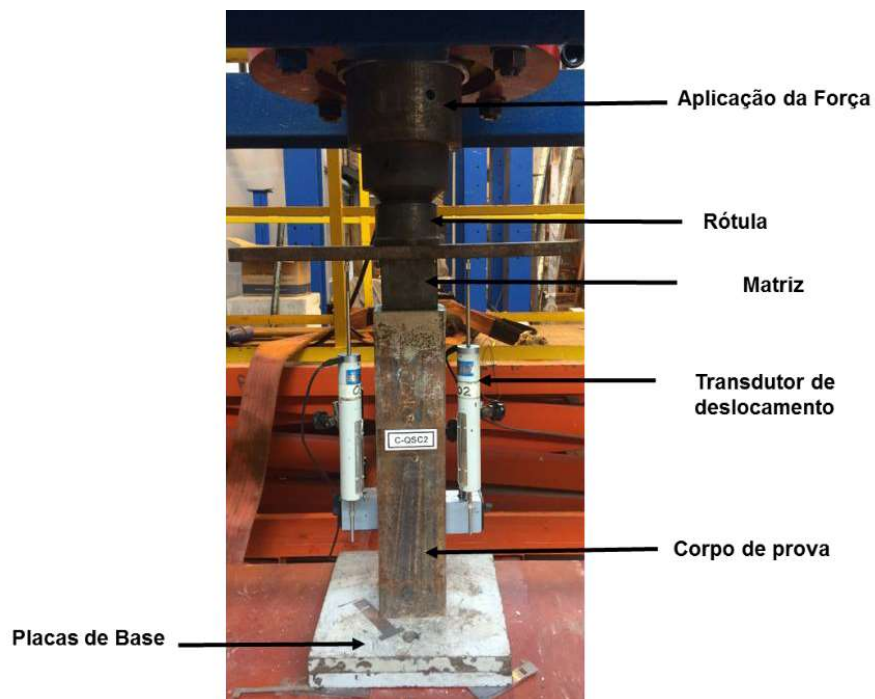


Figura 4.12 - Esquema de ensaio utilizado nos perfis tubulares preenchidos.
Fonte: Autor.

4.2.4.2 Ensaio de caracterização do material

As fases presentes e a pesquisa sobre a formação da geopolimerização no concreto produzido foram avaliadas por difração de raios-x, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microestrutura eletrônica de varredura (MEV).

No ensaio de difração de raios x (DRX) foi utilizado um difratômetro marca Panalytical modelo Empirean com alvo metálico de cobre, com um comprimento de onda (λ) de 1,54060 Å, detector proporcional de xenônio e fendas de 1/2 para o tubo de raio x e de 1/2 e 1/8 para o detector.

Os parâmetros utilizados nas análises por espectroscopia no infravermelho foram: 16 scans da amostra e 8 scans do background, e a resolução foi 4cm^{-1} .

As determinações da morfologia das fases presentes foram realizadas através de fotomicrográficas obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) FEG – Quanta FEG 3D FEI com resolução de 0,8 nm, distância focal de 3 milímetros a 99 milímetros, com aumento de 24x a 800,000x em alto e baixo vácuo.

A resistência mecânica à compressão de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) com idade de 3 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica manual com indicador digital simples da marca EMIC P200, com capacidade para 200 toneladas.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios realizados na presente pesquisa são apresentados neste capítulo. Foram feitas duas etapas de ensaios, primeira etapa de testes preliminares e uma segunda etapa de testes que incluem os ensaios de cisalhamento direto e a caracterização dos materiais.

5.1 Testes preliminares

Os resultados dos ensaios realizados são apresentados na Tabela 13. A partir dos dados foram elaborados os gráficos carregamento *versus* deslizamento e carregamento *versus* tensão de aderência, conforme mostram as Figuras 5.1 a 5.6.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios experimentais.

Fonte: Autor.

Série	Comprimento do Tubo (mm)	Tipo de seção transversal	Atuador hidráulico	Área Total (mm ²)	Força máxima (kN)	Deslizamento máximo (mm)	Tensão de Aderência para a Força máxima (MPa)	
1	CP - 150 - 1	152,29	Quadrada	ENERPAC	61206,39	204,48	28,16	3,71
	CP - 150 - 2	156,21	Circular	MTS	56650,16	490,23	28,55	9,49
	CP - 150 - 3	152,22	Retangular	ENERPAC	61038,22	321,11	27,62	5,88
2	CP - 250 - 1	259,05	Quadrada	MTS	100480,00	303,93	25,88	3,27
	CP - 250 - 2	254,10	Circular	MTS	92153,29	624,73	23,2	7,40
	CP - 250 - 3	255,15	Retangular	MTS	102315,15	452,64	28,48	4,93
3	CP - 350 - 1	354,15	Quadrada	MTS	142339,97	571,01	28,21	4,49
	CP - 350 - 2	353,83	Circular	MTS	126932,91	660,26	9,87	5,62
	CP - 350 - 3	355,25	Retangular	MTS	140350,00	164,71	26,55	1,29

5.1.1 Análise de resultados dos corpos de prova de seção quadrada.

A Figura 5.1 mostra a variação do deslizamento em função da força aplicada nos corpos de prova de seção quadrada. O comportamento dos três corpos de prova é muito similar, diferenciando um do outro praticamente apenas no que diz respeito à força máxima imposta para iniciar o deslocamento do concreto no interior do tubo. Pode-se observar a perda da aderência química no momento em que se apresenta o início do

deslocamento relativo do concreto até a força máxima. Isto fica mais evidente para os corpos de prova CP-250-1 e CP-350-1. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, definem o que se pode chamar de mecanismo parcial de atrito, conforme Parsley *et al.* (2000). Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, nota-se que o comportamento de cada corpo de prova é caracterizado por um ramo suavemente descendente até um nível praticamente constante, demonstrando diminuição da força aplicada com a diminuição da área de contato entre os materiais, exceto para o CP-350-1. Neste caso, no limiar do final do ensaio ocorreu um pequeno aumento no valor da força aplicada.

Na Figura 5.1 nota-se o valor do deslocamento de 6 mm, que é utilizado para se definir a ductilidade de um conector de cisalhamento (EN 1994-1-1:2004) que, no caso desta pesquisa, foi tornado como referência para se definir o comportamento dúctil da aderência entre o concreto e o tubo de aço.

Na Figura 5.2, que apresenta a variação do deslizamento com a tensão de aderência relativa do concreto para os mesmos corpos de prova da Figura 5.1, pode-se observar que quanto maior o comprimento do tubo maior é o valor da tensão de aderência ao longo do ensaio e, portanto, maior é a contribuição do tubo de aço.

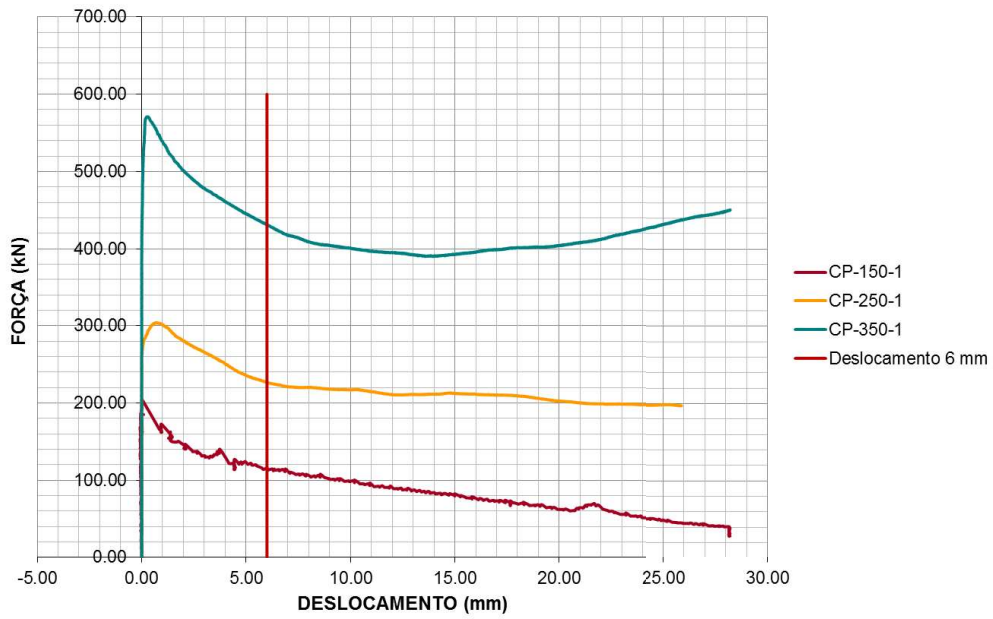


Figura 5.1 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal quadrada.
 Fonte: Autor.

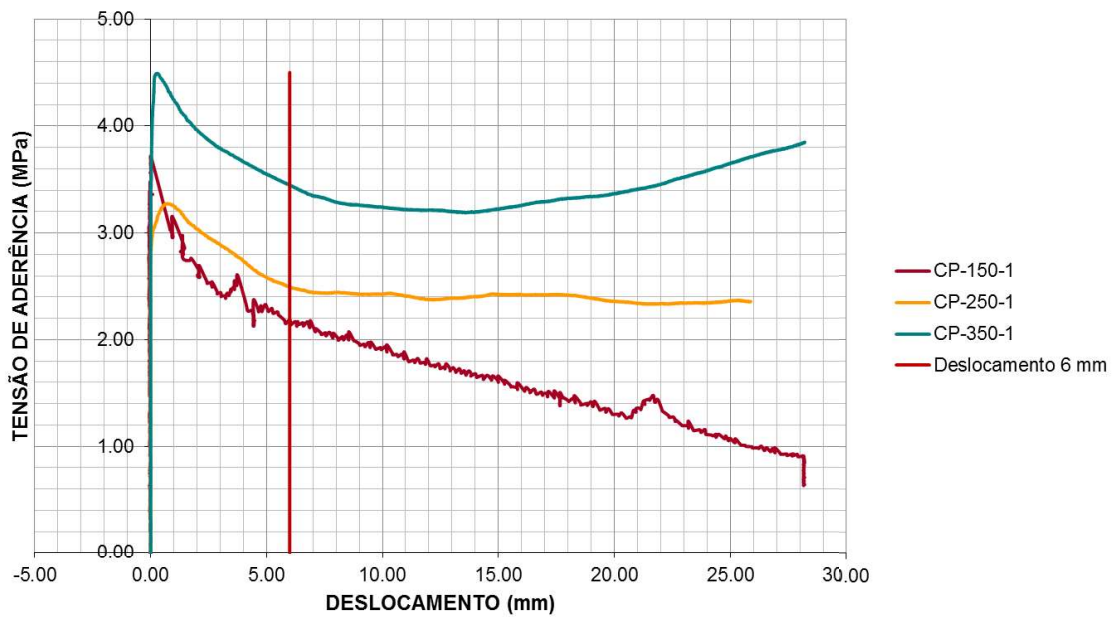


Figura 5.2 - Tensão de aderência versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal quadrada.
 Fonte: Autor.

5.1.2 Análise de resultados dos corpos de prova de seção circular.

A Figura 5.3 mostra a variação do deslizamento em função da força aplicada nos corpos de prova de seção circular, notando-se que os comportamentos dos três corpos de prova variam consideravelmente. No gráfico do CP-250-2 pode-se observar a perda da aderência química quando se atinge o valor da força máxima igual a 624,73 kN, momento em que se apresenta o início dos deslocamentos do núcleo de concreto. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo passam a atuar como um mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, nota-se que o comportamento do CP-250-2 é caracterizado por um ramo suavemente descendente até um nível praticamente constante.

Quanto ao corpo de prova CP-150-2, a força foi aplicada sem evidenciar deslizamento do núcleo de concreto até atingir o valor de 490,23 kN. Assim que esse valor foi alcançado, ocorreu um deslizamento súbito do núcleo de concreto, denotando-se aparente perda da aderência química. Devido a um problema ocorrido com a programação do ensaio no sistema MTS de aplicação de carga, não houve o registro da variação da força a partir do valor de 3,66 mm registrado para o deslizamento do núcleo de concreto. No entanto, como a medição dos deslizamentos foi realizada com um sistema de aquisição de dados independente do Sistema MTS, pode-se registrar os deslocamentos relativos do núcleo de concreto até o valor de 28 mm. Desta forma, pode-se afirmar que com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito o corpo de prova apresentaria um ramo descendente até alcançar um nível praticamente constante.

Um comportamento similar ao do corpo de prova CP-150-2 foi apresentado pelo CP-350-2, com um deslizamento súbito ao se atingir o valor máximo da força aplicada igual a 660,26 kN. Observa-se que, após atingido esse valor máximo, ficou definido um

patamar até ocorrer uma queda brusca da força aplicada, gerando um grande impacto no corpo de prova e, conseqüentemente, no atuador hidráulico. Mantida a continuação do ensaio, o corpo de prova voltou a receber incrementos de força até ser atingido o valor de 657,97 kN, após o que voltou a ocorrer um deslizamento súbito. Observando-se o comportamento do corpo de prova, notam-se sucessivas quedas bruscas da força aplicada, retomada de acréscimos e ocorrência de patamares de força. O ensaio foi então interrompido após a ocorrência de três quedas bruscas de força para evitar danos ao sistema de aplicação de carga. Observando-se o gráfico até o momento da paralisação do ensaio, pode-se verificar que logo após a perda da aderência química passou a ocorrer pequenas e sucessivas perdas de aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito.

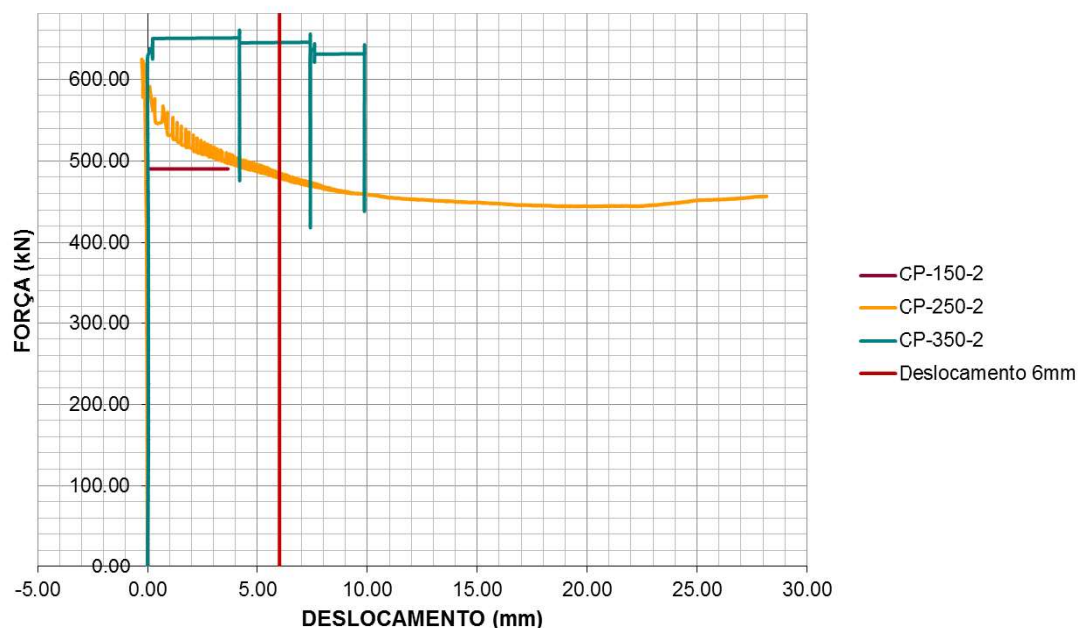


Figura 5.3 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal circular.
Fonte: Autor.

A Figura 5.4 mostra a variação do deslizamento com a tensão de aderência entre os materiais dos corpos de prova. Neste gráfico fica evidente a influência do comprimento dos modelos nos resultados obtidos. O CP-150-2 foi o que obteve a maior tensão de aderência dos nove corpos de prova ensaiados.

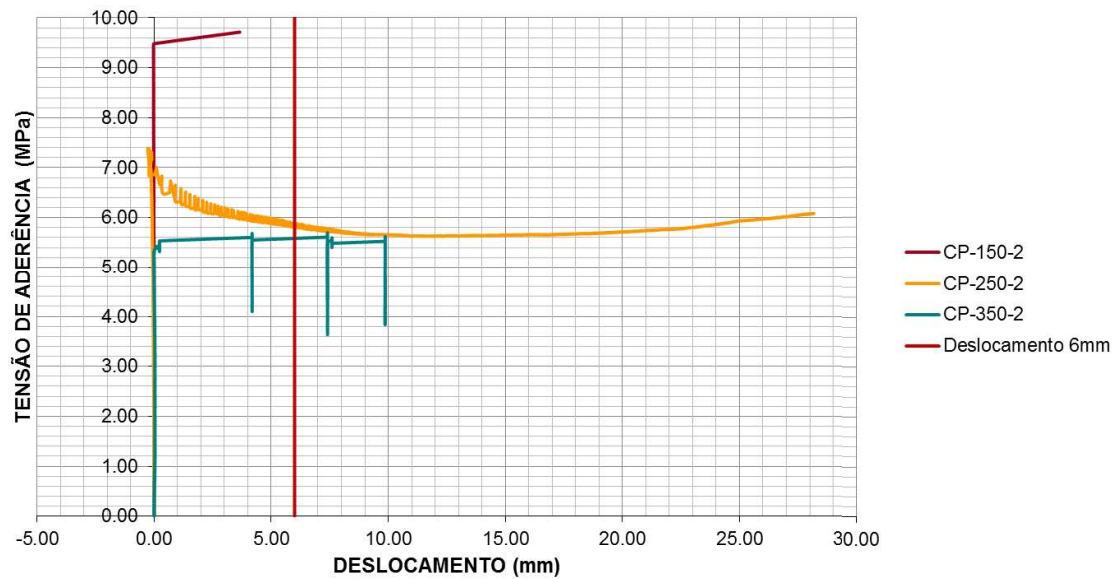


Figura 5.4 - Tensão de aderência *versus* deslizamento dos corpos de prova com seção transversal circular.
Fonte: Autor.

5.1.3 *Análise de resultados dos corpos de prova de seção retangular.*

A Figura 5.5 mostra a variação do deslizamento em função da força aplicada nos corpos de prova de seção retangular. Observam-se comportamentos similares aos dos gráficos da Figura 5.1. Os comportamentos dos três corpos de prova também são similares entre si, diferenciando um do outro no que diz respeito à força máxima imposta para iniciar o deslocamento do núcleo de concreto no interior do tubo. Pode-se observar a súbita perda da aderência química nos corpos de prova CP-150-3 e CP-250-3 no momento em que se apresenta o início do deslocamento relativo do concreto ao se atingir o valor da força máxima. No CP-350-3 a perda de aderência ocorreu de modo mais suave. Após atingido este estágio, em cada um dos corpos de prova a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, atuam como um mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, nota-se que o comportamento de cada corpo de prova é caracterizado por um ramo

suavemente descendente, demonstrando diminuição da força aplicada com a diminuição da área de contato entre os materiais.

Quanto ao corpo de prova CP-150-3, a perda da aderência química ocorreu ao atingir um valor de força máxima aplicada de 328,55 kN, com participação da aderência mecânica e do confinamento, apresentando um deslizamento súbito. No entanto, esses fatores têm influência cada vez menor, uma vez que a área de contato entre o concreto e o aço vai diminuindo ao longo do ensaio. O que justifica o ramo descendente logo após ter sido atingida a carga máxima.

O CP-350-3 apresentou um comportamento atípico em relação à força máxima correspondente à perda de aderência química, que foi menor quando comparada às correspondentes forças dos corpos de prova CP-150-3 e 250-3. Quanto a isto, ainda existem dúvidas em relação ao que resultou esse comportamento; essas dúvidas serão posteriormente sanadas.

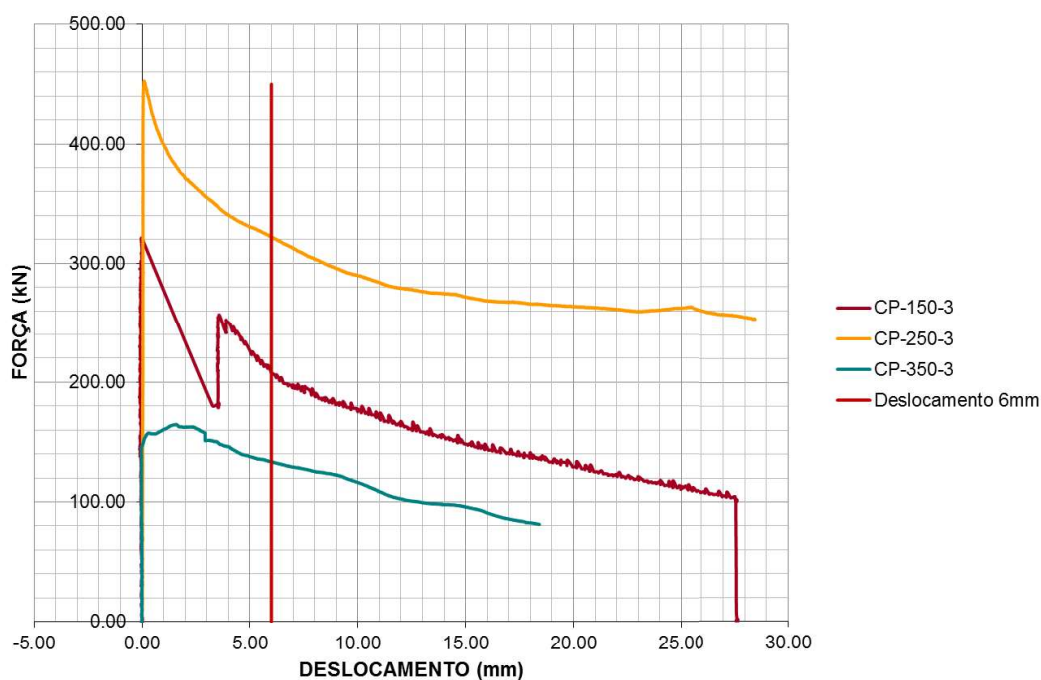


Figura 5.5 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular.
Fonte: Autor.

A Figura 5.6 mostra a variação do deslizamento com a tensão de aderência entre os materiais dos corpos de prova. Neste gráfico fica evidente a influência do comprimento dos modelos nos resultados obtidos.

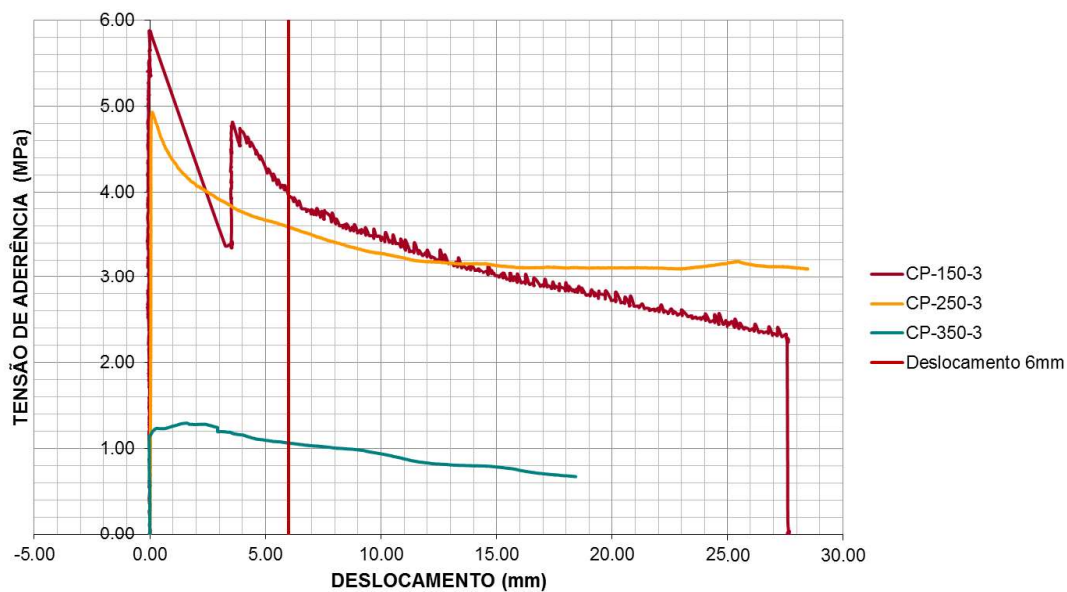


Figura 5.6 - Tensão de aderência versus deslocamento dos corpos de prova com seção transversal retangular.
Fonte: Autor

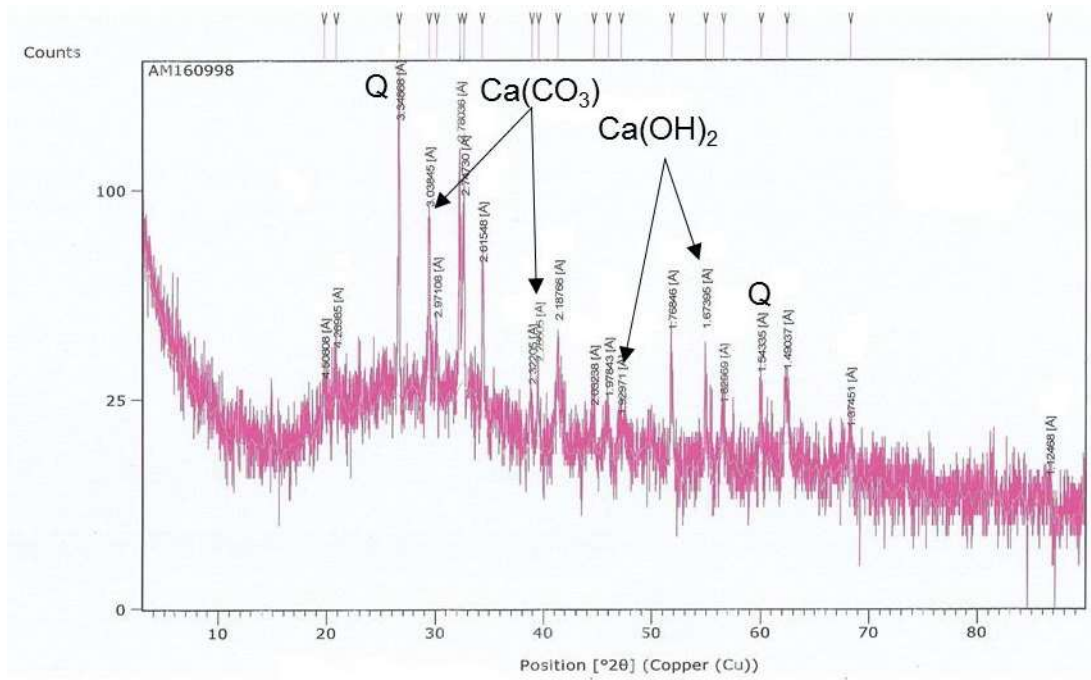
A Tabela 14 apresenta uma comparação entre as tensões de aderência calculadas para a força máxima aplicada e as tensões de aderência correspondentes aos deslocamentos iguais a 6 mm obtidas nos testes preliminares.

Tabela 14 - Tensões de aderência obtidas nos ensaios de deslizamento.
 Fonte: Autor.

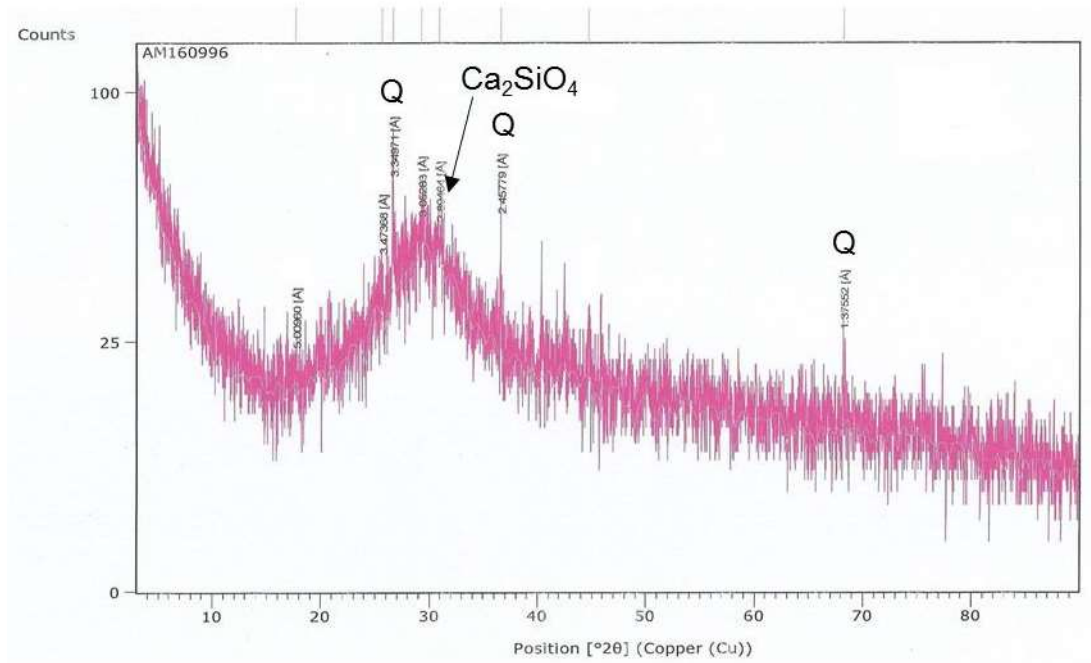
Série		$\sigma_{\text{máximo}}$ (MPa)	$\sigma_{6 \text{ mm}}$ (MPa)
1	CP - 150 - 1	3,71	2,14
	CP - 150 - 2	9,49	--
	CP - 150 - 3	5,88	3,93
2	CP - 250 - 1	3,27	2,49
	CP - 250 - 2	7,40	5,88
	CP - 250 - 3	4,93	3,59
3	CP - 350 - 1	4,49	3,45
	CP - 350 - 2	5,62	5,55
	CP - 350 - 3	1,29	1,06

5.2 Difração de raios-x (DRX)

A Figura 5.7 são apresentados os difratogramas do material precursor e da pasta geopolimérica obtido por meio da análise DRX. Na Figura 5.8 (a) observa-se picos característicos de material cristalino, os quais indicam a presença de materiais como quartzo, silicato de cálcio (Ca_2SiO_4), hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), calcita ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), entre outros; originados da calcinação incompleta da caulinita. Na Figura 5.8 (b) nota-se um halo amorfo em torno de $2\theta \approx 27^\circ$ e 29° , o que é característico nos materiais geopoliméricos (Davidovits (2011); Gonçalves (2016)). Os principais picos observados na Figura 5.8 (b) são atribuídos à presença de quartzo. Os picos observados no halo difuso em torno de $2\theta \approx 25^\circ$ e 29° indicam a presença sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). O pico no halo difuso de $2\theta \approx 31^\circ$ é comum do composto de silicato de cálcio (Ca_2SiO_4). As informações da presença dos compostos foram fornecidas pelo The International Centre for Diffraction Data.



(a)



(b)

Figura 5.7 - Espectro obtido por DRX da pasta do concreto geopolimérico II: a) material precursor (Q = quartzo, $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ = calcita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = hidróxido de cálcio); b) pasta geopolimérica (Q = quartzo, Ca_2SiO_4 = silicato de cálcio).

Fonte: Autor.

5.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 5.8 apresenta a banda de absorção no infravermelho obtidos pelo FTIR da amostra da pasta geopolimérica do concreto geopolimérico II.

Na Figura 5.9 observa-se um pico em torno aos 680 cm^{-1} que indica a presença do grupo funcional AlO_2 (Provis e Van Deventer, 2009). Catauro *et al.* (2015) estabelece que as vibrações entre os 800 cm^{-1} e 430 cm^{-1} são características da formação de aluminossilicatos devido às reações do processo de geopolimerização. Segundo Gonçalves (2016), a banda observada entre os 950 cm^{-1} a 1200 cm^{-1} é decorrente da reorganização dos compostos AlO_4 ou SiO_4 devida ao processo de geopolimerização. Catauro *et al.* (2015) afirma que as vibrações mais fortes típicas dos aluminossilicatos são atribuídas às vibrações internas de Si-O-Si e Si-O-Al, visíveis como alongamento e dobramento de Si-O-Si presentes na banda dos 1080 cm^{-1} . O pico em torno aos 1400 cm^{-1} é decorrente de um processo de carbonatação, esse processo poderia ser atribuído à formação de carbonatos a partir do hidróxido presente no ativador que não reagiu e ao gás carbônico da atmosfera (Gonçalves, 2016). A vibração entre 3695 cm^{-1} e 3660 cm^{-1} descrevem um grupo de hidroxilas que indicam uma conversão incompleta de caulim a metacaulim no processo de calcinação (Catauro *et al.*, 2015). Os picos evidenciados entre as bandas entre 3440 cm^{-1} e 1650 cm^{-1} são resultado da água de hidratação proveniente do processo de formação de geopolimerização (Catauro *et al.*, 2015).

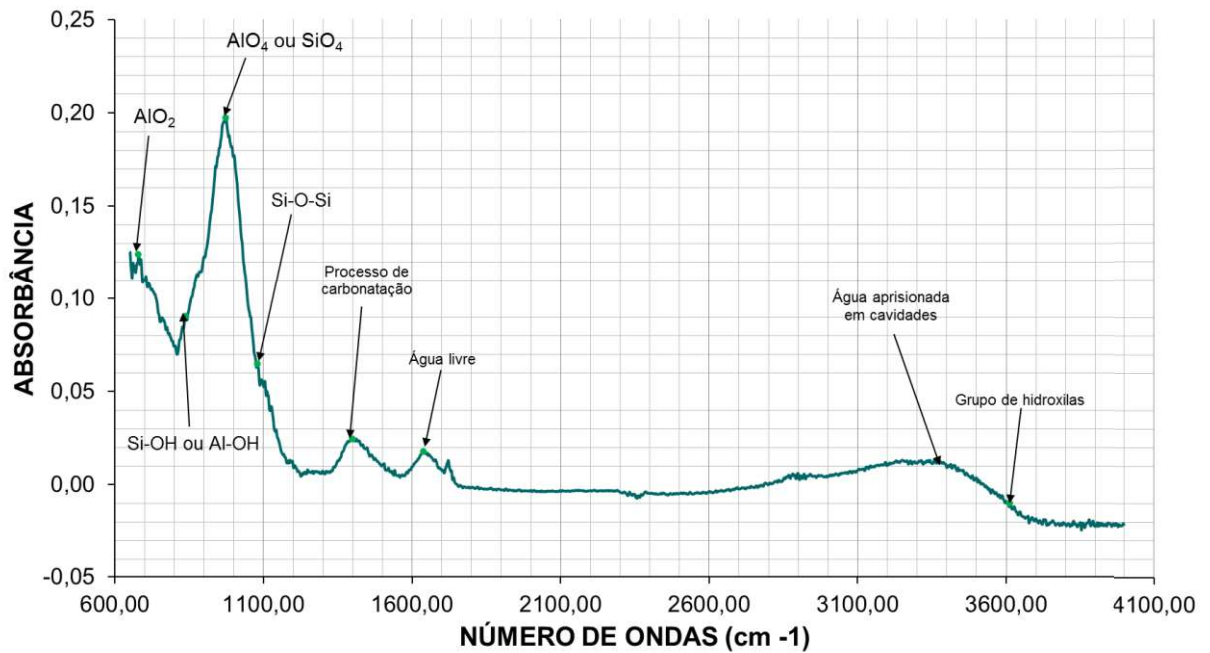


Figura 5.8 - Espectro obtido por FTIR da pasta do concreto geopolimérico II.
Fonte: Autor.

5.4 Microestrutura eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 5.9 apresenta algumas das imagens obtidas pelo MEV. A Figura 5.9 (a) apresenta uma cadeia de cristais de forma irregular, que provavelmente é a representação da zeólita X, devido à semelhança com a imagem obtida por KRÓL *et al.*, (2016). Na Figura 5.9 (b) são vistas estruturas semelhantes a azulejos apesar da diferença de ampliação é provavelmente o material descrito por KRÓL *et al.*, (2016). Segundo KOTOVA *et al.*, (2016) os tamanhos das zeólita podem se observar em várias escalas micrométricas. A Figura 5.9 (c) mostra uma estrutura similar à encontrada por GONÇALVES (2016) onde se evidencia a presença de estruturas esféricas condizente com o formato de zeólitas naturais a presença de cristais de 0,64 μm demonstram o caráter nanométrico da cristalinidade do material (DUXSON (2006)).

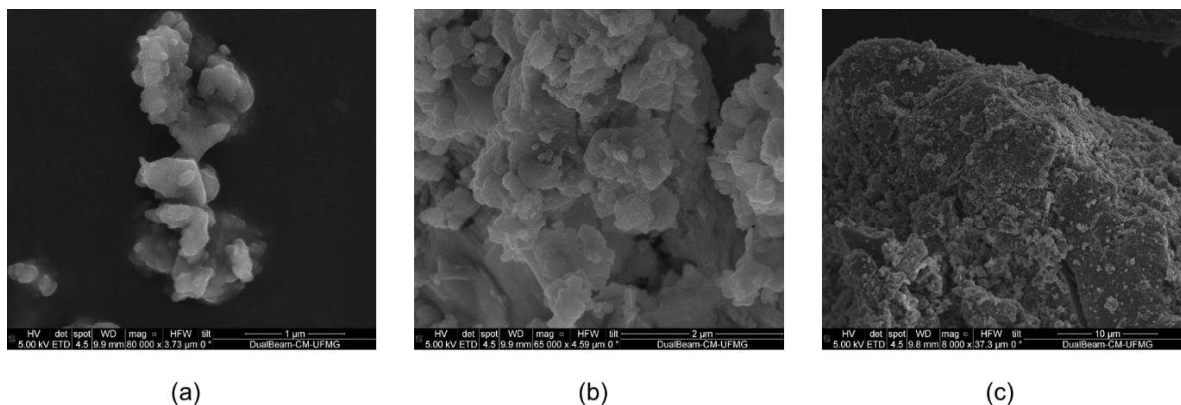


Figura 5.9 - Imagens obtidas do MEV da pasta do concreto geopolimérico II: a) ampliação de 80.000 vezes; b) ampliação de 65.000 vezes; c) ampliação de 8.000 vezes.

Fonte: Autor.

5.5 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de concreto geopolimérico I com idade de 28 dias são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico I aos 28 dias.

Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)
CPG-1	65,21	8,46
CPG-2	54,82	7,11
Média	60,01	7,79
Desvio Padrão	7,35	0,95
Coefficiente de Variação (%)	12,24	12,24

O concreto geopolimérico I foi projetado para atingir uma resistência característica, f_{ck} , de 30 MPa. Como se nota na Tabela 15, a média das resistências não atendeu as expectativas, devido que a resistência encontrada equivale ao 25% da resistência esperada. Provavelmente, um dos fatores que influenciaram a queda na resistência do concreto geopolimérico I foi o endurecimento acelerado, a relação ativador/precursor utilizada e o adensamento.

Devido à baixa resistência à compressão apresentada aos 28 dias, não foi possível dar início aos ensaios de cisalhamento direto. Foi então necessário realizar outro ensaio à compressão aos 45 dias. A Tabela 16 apresenta os resultados dos corpos de prova com idade de 45 dias.

Tabela 16 - Carga de ruptura do corpo de prova do concreto geopolimérico I aos 45 dias.

Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)
CPG-3	92,21	11,97

A resistência à compressão do corpo de prova CPG1-3 evidencia um incremento significativo de resistência, atingindo 40% da resistência esperada. No entanto, este resultado também não foi satisfatório para dar início aos ensaios de cisalhamento direto. Foi então realizado um terceiro ensaio com idade de 73 dias. A Tabela 17 apresenta os resultados dos corpos de prova com idade de 73 dias.

Tabela 17 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico I aos 73 dias.

Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)
CPG-4	179,62	23,31
CPG-5	189,53	24,60
Média	184,58	23,96
Desvio Padrão	7,01	0,91
Coeficiente de Variação (%)	3,80	3,80

Com 73 dias de idade, o concreto apresentou resistência à compressão em valor médio de 23,96 MPa, equivalente a 80% da resistência esperada. Considerando que o valor da resistência à compressão obtido aos 73 dias se encontrou dentro da expectativa,

tomou-se a decisão de realizar os ensaios de deslizamento direto dos perfis tubulares preenchidos.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de concreto geopolimérico II com idade de 8 dias são descritos na Tabela 18.

Tabela 18 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico II aos 8 dias.

Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)
CPG2-1	53,50	6,94
CPG2-2	54,10	7,02
CPG2-3	59,83	7,77
Média	55,81	7,24
Desvio Padrão	3,49	0,45
Coeficiente de Variação (%)	6,26	6,26
Mínimo	53,50	6,94
Máximo	59,83	7,77

A média das resistências apresentou valor próximo a 24% da resistência esperada. Aos 14 dias de idade foi realizado o ensaio de compressão de outros 3 corpos de prova. Os resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico II aos 14 dias.

Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)
CPG2-4	52,55	6,82
CPG2-5	52,67	6,84
CPG2-6	42,04	5,46
Média	49,09	6,37
Desvio Padrão	6,11	0,79
Coeficiente de Variação (%)	12,44	12,44
Mínimo	42,04	5,46
Máximo	52,67	6,84

Nos resultados dos corpos de prova com idade de 14 dias não se evidencia um aumento na resistência à compressão, sendo que o valor médio equivale ao 21,22% da resistência estimada. Foi realizado o ensaio de um corpo de prova com idade de 28 dias para verificar a se a resistência à compressão continuava abaixo dos 20 MPa e tomar a decisão de esperar mais tempo para a realização dos ensaios de cisalhamento direto. A Tabela 20 apresenta os resultados do corpo de prova com idade de 28 dias.

Tabela 20- Carga de ruptura do corpo de prova do concreto geopolimérico II aos 28 dias.

Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)
CPG2-7	110,85	14,39

O corpo de prova CPG2-7 atingiu um valor de resistência maior quando comparado com os corpos de prova com idades de 7 e 14 dias. O valor equivale a 48% da resistência esperada para esta idade.

O fato de ter mudado a relação ativador/precursor, a diferença nos compósitos do ativador e precursor, o processo de endurecimento mais lento, o tipo de adensamento e as condições de umidade e temperatura no dia da concretagem, fizeram com que houvesse uma diferença significativa em relação aos resultados obtidos para o concreto geopolimérico I.

Devido que não foi atingida a resistência à compressão mínima (20 MPa) com uma idade de 28 dias, tomou-se a decisão de esperar mais tempo para a realização dos ensaios nos perfis tubulares preenchidos. Foi realizado um quarto conjunto de ensaios com idade de 56 dias. A Tabela 21 apresenta os resultados dos corpos de prova com idade de 56 dias.

Tabela 21 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto geopolimérico II aos 56 dias.

Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)
CPG2-8	157,05	20,38
CPG2-9	157,28	20,41
CPG2-10	158,72	20,60
CPG2-11	153,70	19,95
CPG2-12	161,83	21,00
CPG2-13	172,70	22,41
CPG2-14	153,59	19,93
CPG2-15	149,04	19,34
Média	157,99	20,51
Desvio Padrão	7,08	0,92
Coefficiente de Variação (%)	4,48	4,48
Mínimo	149,04	19,34
Máximo	172,70	22,41

A média das resistências apresentou um valor de 20,51 MPa, equivalente a 68,36% da resistência esperada. Este valor se encontrou dentro da expectativa de valor mínimo de 20 MPa para se dar início aos ensaios dos perfis tubulares preenchidos.

Os corpos de prova de concreto geopolimérico apresentaram rupturas bruscas e com formato geométrico colunar, conforme ilustrado na Figura 5.10.



(a)



(b)

Figura 5.70 - Ruptura corpos de prova de concreto geopolimérico: a) concreto geopolimérico I; b) concreto geopolimérico II.

Fonte: Autor.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de concreto convencional com idade de 14 dias são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto convencional aos 14 dias.

Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)
CPC-1	69,03	8,96
CPC-2	58,64	7,61
CPC-3	80,62	10,46
Média	69,43	9,01
Desvio Padrão	10,99	1,43
Coefficiente de Variação (%)	15,83	15,83
Mínimo	58,64	7,61
Máximo	80,62	10,46

A média das resistências não se encontra dentro das expectativas, devido que o concreto foi fabricado para atingir uma resistência à compressão igual a 30 MPa.

Aos 28 dias de idade foram realizados ensaios de compressão de outros corpos de prova. Tendo sido atingido um valor máximo igual a 26,36 MPa para resistência à compressão. Desta forma tomou-se a decisão de realizar os ensaios dos perfis tubulares preenchidos. A Tabela 23 apresenta os resultados dos corpos de prova com idade de 28 dias.

Tabela 23 - Carga de ruptura dos corpos de prova do concreto convencional aos 28 dias.

Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)
CPC-4	203,07	26,36
CPC-6	195,43	25,37
CPC-7	198,97	25,82
Média	199,16	25,85
Desvio Padrão	3,82	0,50
Coefficiente de Variação (%)	1,92	1,92
Mínimo	195,43	25,37
Máximo	203,07	26,36

O resultado do corpo de prova CPC-5 apresenta uma variação significativa em relação aos corpos de prova CPC-4, CPC-6 e CPC-7, isto pode ser efeito do adensamento dos corpos de prova ou da atuação do efeito de retração por secagem ou contração térmica (CAMPOLINA, 2008).

Fica evidente que aos 28 dias o concreto não atingiu o valor da resistência à compressão projetada de 30 MPa, um dos motivos pode estar relacionado à variação do fator água/cimento realizada na hora da concretagem e ao fato de não ter sido realizado nenhum processo de cura no material.

5.6 Ensaio de cisalhamento

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto são apresentados na Tabela 24. A partir dos dados foram elaborados os gráficos carregamento versus deslizamento e carregamento versus tensão de aderência, conforme mostram as Figuras 5.11 a 5.18.

Tabela 24 - Resultados ensaios de cisalhamento direto (push out).
Fonte: Autor.

Corpo de Prova	Comprimento do Tubo (mm)	Tipo de seção transversal	Atuador hidráulico	Área Total (mm ²)	Força máxima (kN)	Deslizamento máximo (mm)	Tensão de Aderência para a Força máxima (MPa)
G1-RSC1	499,22	Retangular	TORVEL (200 ton)	244602,00	22,79	35,65	0,09
G1-RSC2	497,88	Retangular	ENERPA C (40 ton)	244721,25	31,99	38,77	0,13
G1-RC1	493,5	Retangular	ENERPA C (40 ton)	244161,00	55,00	39,90	0,23
G1-RC2	490,1	Retangular	ENERPA C (40 ton)	244752,75	35,45	35,03	0,14
G2-QSC1	498,08	Quadrada	ENERPA C (40 ton)	184000,50	80,83	40,18	0,44
G2-QSC2	500,35	Quadrada	ENERPA C (40 ton)	184783,50	83,99	39,57	0,45
G2-CSC1	499,5	Circular	TORVEL (200 ton)	133288,74	475,04	33,50	3,56
G2-CSC2	497,33	Circular	TORVEL (200 ton)	130652,16	453,11	35,28	3,47
C-RSC1	497,83	Retangular	TORVEL (200 ton)	244806,75	80,39	33,92	0,33
C-RSC2	499,4	Retangular	TORVEL (200 ton)	245031,75	92,91	48,31	0,38
C-RC1	501,1	Retangular	TORVEL (200 ton)	244671,75	93,94	35,48	0,39
C-RC2	499,95	Retangular	TORVEL (200 ton)	244761,75	79,37	33,51	0,32
C-QSC1	499,13	Quadrada	TORVEL (200 ton)	184240,80	123,10	35,47	0,67
C-QSC2	499,58	Quadrada	TORVEL (200 ton)	184482,00	83,65	35,08	0,45
C-CSC1	498,5	Circular	TORVEL (200 ton)	130853,62	391,67	33,86	2,99
C-CSC2	499,13	Circular	TORVEL (200 ton)	131150,50	325,49	38,30	2,48
C-CSC3	500,1	Circular	TORVEL (200 ton)	130906,63	399,46	35,95	3,05

5.6.1 *Análise de resultados dos corpos de prova de seção retangular sem corte longitudinal.*

A Figura 5.10 mostra a variação do deslizamento em função da força aplicada nos corpos de prova de seção retangular sem corte longitudinal. Podem ser observados comportamentos similares aos dos gráficos da Figura 5.5. Os comportamentos dos corpos de prova de concreto convencional (C-RSC1 e C-RSC2) são similares entre si,

diferenciando um do outro no que diz respeito à força máxima imposta para iniciar o deslocamento do núcleo de concreto no interior do tubo. Pode-se observar a perda da aderência química no momento em que se apresenta o início do deslocamento relativo do concreto ao se atingir o valor da força máxima nos perfis preenchidos com concreto convencional. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, atuam como um mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, nota-se que os comportamentos dos corpos de prova C-RSC1 e C-RSC2 são caracterizados por ramos descendentes.

Quanto aos corpos de prova de concreto geopolimérico, G1-RSC1 e G1-RSC2 apresentaram valores de força máxima menores quando comparados com os valores obtidos nos corpos de prova C-RSC1 e C-RSC2. O corpo de prova G1-RSC1 não apresenta uma a perda da aderência química tão pronunciada como se observa nos outros corpos de prova. No entanto, inicia-se o deslocamento relativo do concreto e o perfil de aço ao se atingir o valor da força máxima. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, atuam como um mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, o comportamento é caracterizado por um ramo suavemente descendente. No corpo de prova preenchido com concreto geopolimérico G1-RSC2 pode-se observar a perda da aderência química no momento em que se apresenta o início do deslocamento relativo do concreto ao se atingir o valor da força máxima. Os comportamentos dos perfis tubulares preenchidos com concreto geopolimérico são similares entre si, diferenciando um do outro no que diz respeito à força máxima imposta para iniciar o deslocamento do núcleo de concreto no interior do tubo.

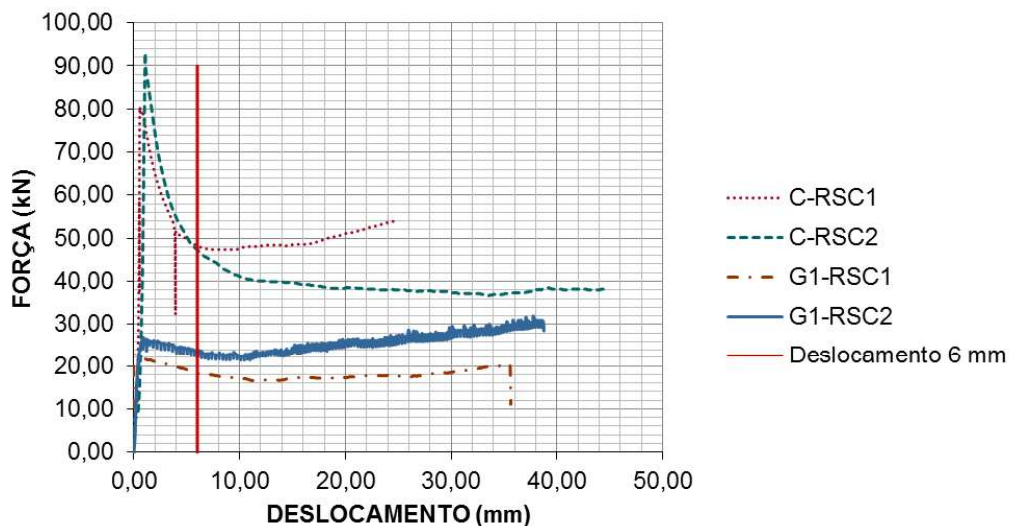


Figura 5.10 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular sem corte longitudinal.
 Fonte: Autor.

A Figura 5.12 mostra a variação do deslizamento com a tensão de aderência entre os materiais dos corpos de prova preenchidos C-RSC1, C-RSC2, G1-RSC1 e G1-RSC2. Observa-se que não foi atingido valor mínimo de tensão de aderência estabelecido por norma para perfis tubulares preenchidos de seção transversal retangular, igual a 0,4 MPa (EN 1994-1-1:2004).

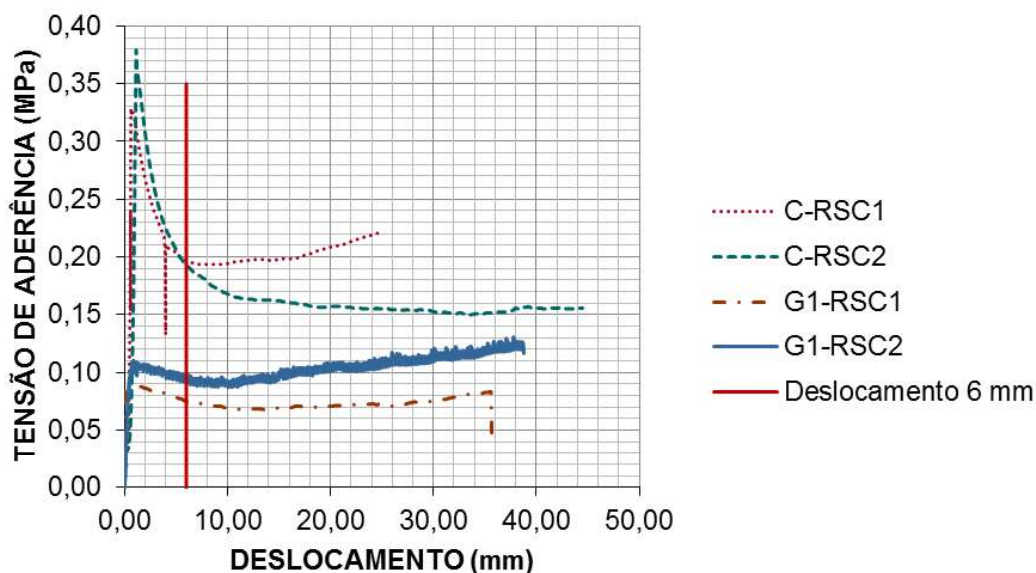


Figura 5.12 - Tensão de aderência versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular sem corte longitudinal.
 Fonte: Autor.

5.6.2 Análise de resultados dos corpos de prova de seção retangular com corte longitudinal.

A Figura 5.13 mostra a variação do deslizamento em função da força aplicada nos corpos de prova de seção retangular com corte longitudinal. Os comportamentos dos corpos de prova de concreto convencional (C-RC1 e C-RC2) são similares entre si, diferenciando um do outro no que diz respeito à força máxima imposta para iniciar o deslocamento do núcleo de concreto no interior do tubo. Pode-se observar a perda da aderência química no momento em que se apresenta o início do deslocamento relativo do concreto ao se atingir o valor da força máxima nos perfis preenchidos com concreto convencional. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, atuam como um mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, nota-se que os comportamentos dos corpos de prova C-RC1 e C-RC2 são caracterizados por ramos descendentes com pequenos acréscimos de força de aderência no final do ensaio.

O efeito do corte longitudinal nos corpos de prova C-RC1 e C-RC2 evidenciou-se no comportamento da aderência mecânica e o mecanismo parcial de atrito após atingida a forma máxima imposta. Os gráficos mostram ramos descentes mais acentuados que os observados nos corpos de prova C-RSC1 e C-RSC2, conforme a Figura 5.13.

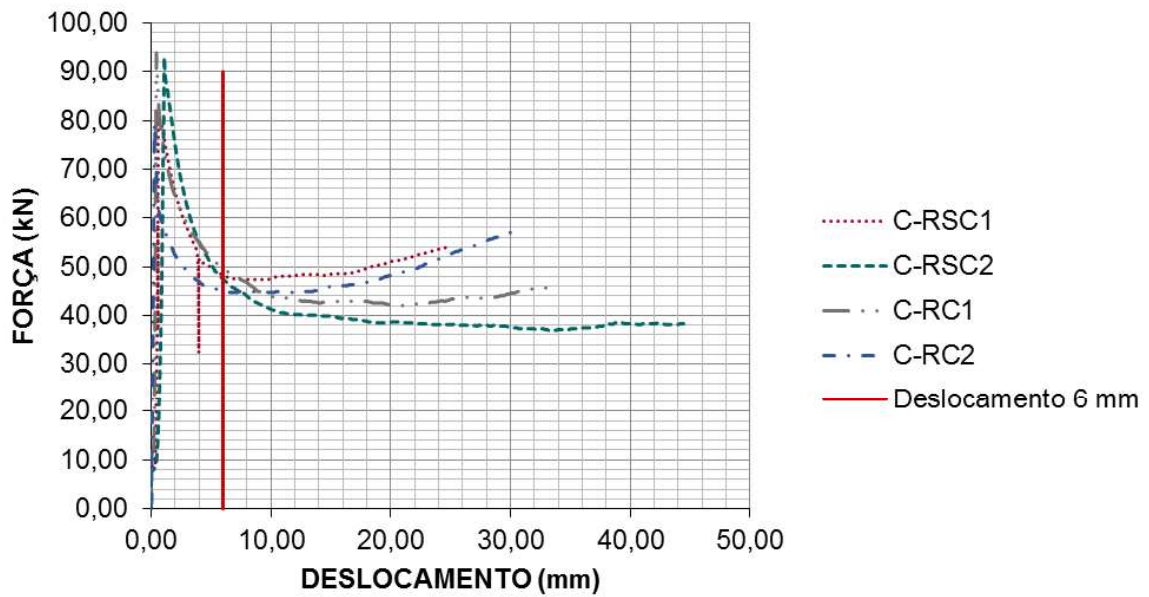


Figura 5.83 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular com e sem corte longitudinal preenchidos com concreto convencional.
Fonte: Autor.

Quanto aos corpos de prova de concreto geopolimérico, G1-RC1 e G1-RC2 eles apresentaram valores de força máxima menores quando comparados com os valores obtidos nos corpos de prova C-RC1 e C-RC2. O corpo de prova G1-RC2 apresentou um deslocamento súbito após atingido o valor máximo de força aplicada. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, atuam como um mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, o comportamento é caracterizado por um ramo suavemente descendente. O corpo de prova G1-RC1 após atingir o valor máximo de carga imposta, não apresentou o ramo suavemente descendente encontrado nos outros corpos de prova, o corpo de prova apresentou deslocamentos para valores de força praticamente constante.

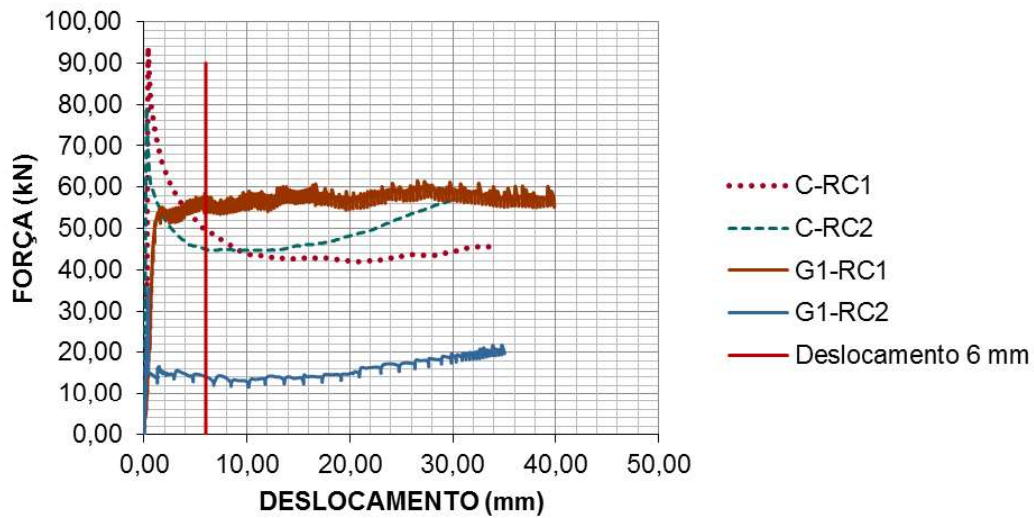


Figura 5.94 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular com corte longitudinal.
Fonte: Autor.

A Figura 5.14 mostra a variação do deslizamento com a tensão de aderência entre os materiais dos corpos de prova preenchidos C-RC1, C-RC2, G1-RC1 e G1-RC2. Observa-se que não foi atingido o valor mínimo de tensão de aderência estabelecido por norma para perfis tubulares preenchidos de seção transversal retangular de 0,4 MPa (EN 1994-1-1:2004).

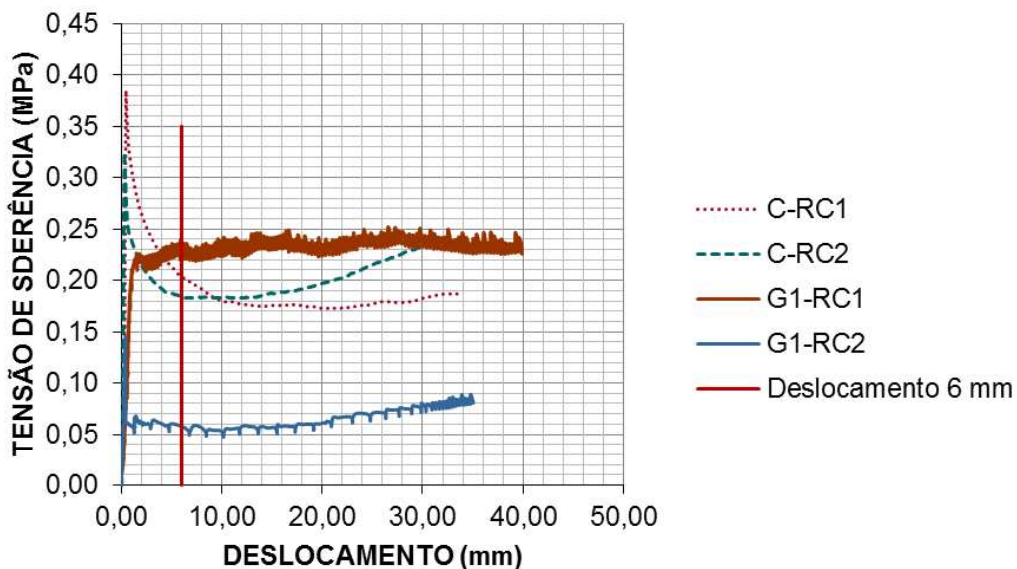


Figura 5.105 Tensão de aderência versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal retangular com corte longitudinal.
Fonte: Autor.

5.6.3 *Análise de resultados dos corpos de prova de seção quadrada sem corte longitudinal.*

A Figura 5.15 mostra a variação do deslizamento em função da força aplicada nos corpos de prova de seção quadrada sem corte longitudinal. Os comportamentos dos corpos de prova C-QSC1 e C-QSC2 são muito similares, diferenciando um do outro praticamente apenas no que diz respeito à força máxima imposta para iniciar o deslocamento do concreto no interior do tubo. Pode-se observar a perda da aderência química no momento em que se apresenta o início do deslocamento relativo do concreto até a força máxima. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, atuam como um mecanismo parcial de atrito. Nota-se que o comportamento de cada corpo de prova é caracterizado por um ramo descendente.

Quanto aos corpos de prova de concreto geopolimérico II, G2-QSC1 e G2-QSC2 apresentaram valores de força máxima similares quando comparados com o valor obtido no corpo de prova C-QSC2. Os comportamentos dos corpos de prova G2-QSC1 e G2-QSC2 são muito similares, ambos com praticamente o mesmo valor de força máxima imposta para iniciar o deslocamento do concreto no interior do tubo. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, atuam como um mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, os comportamentos são caracterizados por ramos suavemente descendentes e coincidentes entre si.

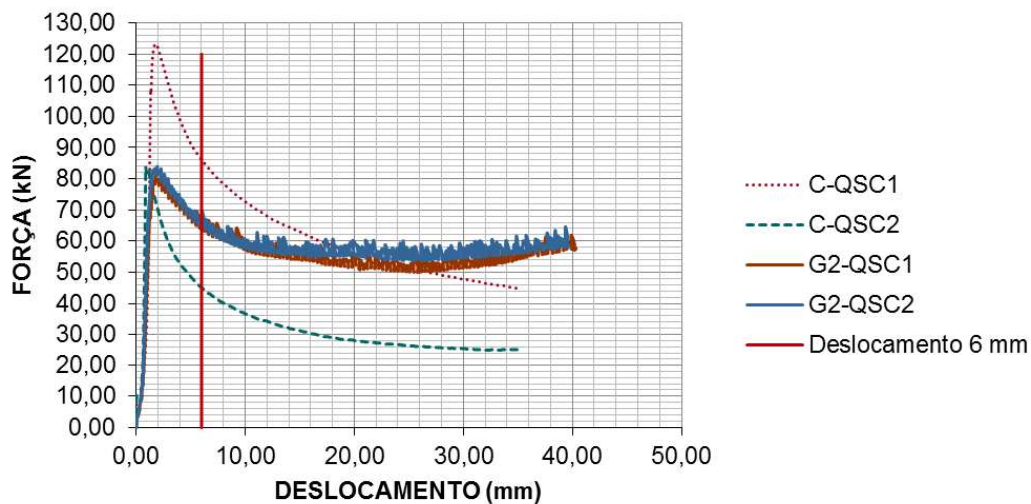


Figura 5.116 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal quadrada sem corte longitudinal.
Fonte: Autor.

A Figura 5.16 mostra a variação do deslizamento com a tensão de aderência entre os materiais dos corpos de prova preenchidos C-QSC1, C-QSC2, G2-QSC1 e G2-QSC2. Observa-se que todos os corpos de prova atingiram o valor mínimo de tensão de aderência estabelecido por norma para perfis tubulares preenchidos de 0,4 MPa (EN 1994-1-1:2004).

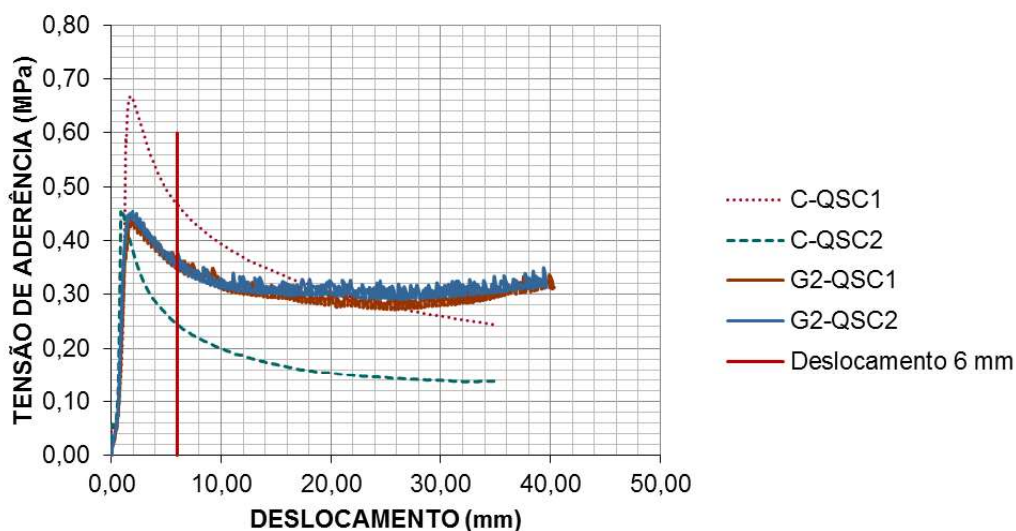


Figura 5.17 - Tensão de aderência versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal quadrada sem corte longitudinal.
Fonte: Autor

5.6.4 Análise de resultados dos corpos de prova de seção circular sem corte longitudinal.

A Figura 5.17 mostra a variação do deslizamento em função da força aplicada nos corpos de prova de seção circular. Nos corpos de prova C-CSC1, C-CSC2 e C-CSC3 pode-se observar a perda da aderência química quando se atinge o valor da força máxima. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo passam a atuar como um mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, nota-se que os comportamentos dos corpos de prova preenchidos com concreto convencional são caracterizados por ramos descendentes até um nível praticamente constante.

Quanto aos corpos de prova preenchidos com concreto geopolimérico, G2-CSC1 e G1-CSC2, eles apresentaram valores de força máxima maiores quando comparados com os valores obtidos nos corpos de prova C-CSC1, C-CSC2 e C-CSC3. Os comportamentos dos corpos de prova G2-QSC1 e G2-QSC2 são muito similares, ambos com praticamente apenas o mesmo valor da força máxima imposta para iniciar o deslocamento do concreto no interior do tubo. Após atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, atuam como um mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, o comportamento do corpo de prova G2-CSC2 é caracterizado por um ramo suavemente descendente. O corpo de prova G2-CSC1, após atingir o valor máximo de carga imposta, apresentou deslocamentos para valores de força praticamente constantes. O que pode levar à conclusão de que a perda da aderência química dos perfis circulares preenchidos com concreto geopolimérico ocorre para forças maiores quando comparados com os perfis circulares preenchidos com concreto convencional.

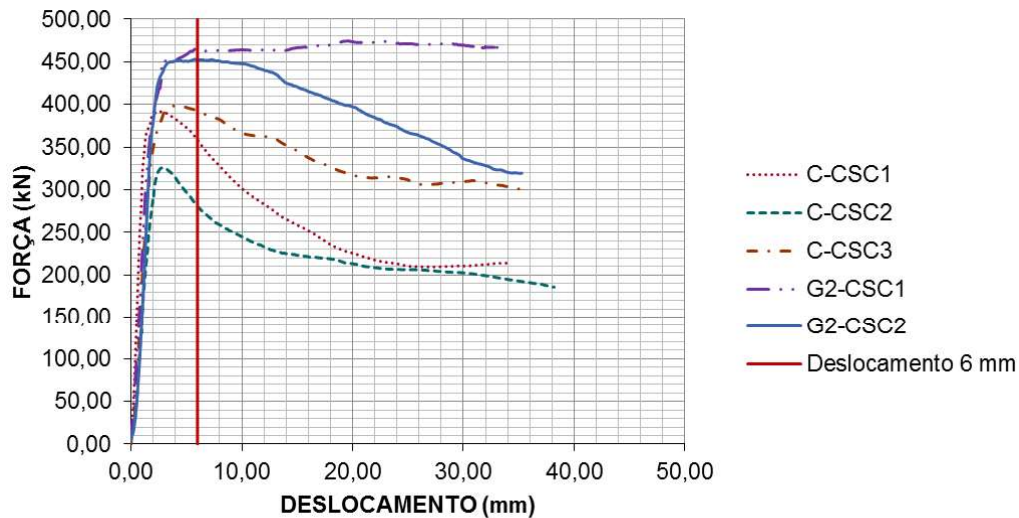


Figura 5.18 - Força versus deslizamento dos corpos de prova com seção transversal circular sem corte longitudinal.
Fonte: Autor.

A Figura 5.18 mostra a variação do deslizamento com a tensão de aderência entre os materiais dos corpos de prova preenchidos C-CSC1, C-CSC2, C-CSC3, G2-QSC1 e G2-QSC2. Observa-se que todos os corpos de prova superaram o valor mínimo de tensão de aderência estabelecido por norma para perfis tubulares preenchidos de seção transversal circular de 0,55 MPa (EN 1994-1-1:2004).

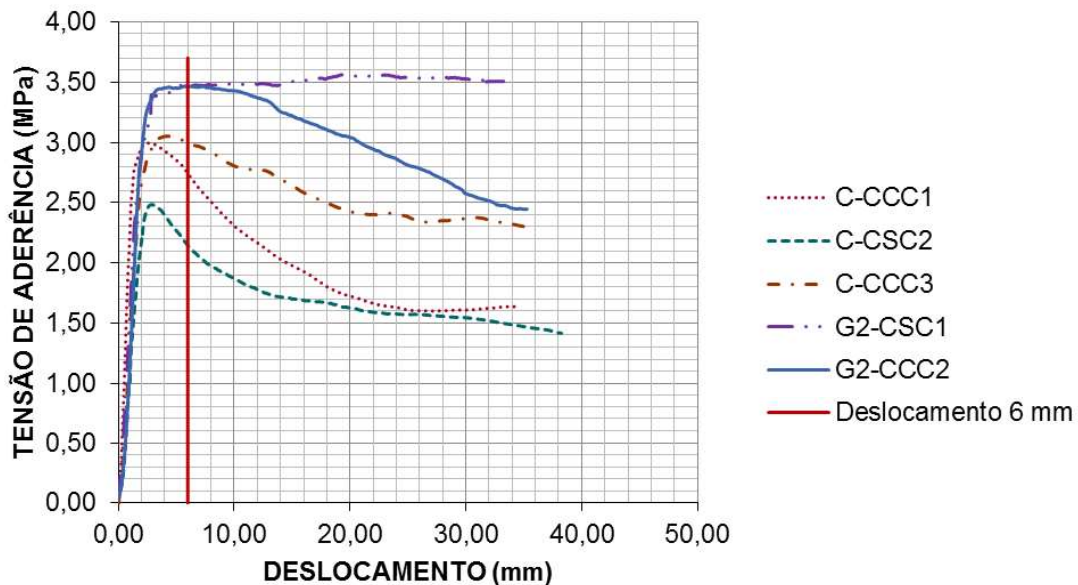


Figura 5.121 - Tensão de aderência *versus* deslizamento dos corpos de prova com seção transversal circular sem corte longitudinal.
Fonte: Autor.

A Tabela 25 apresenta uma comparação entre as tensões de aderência calculadas para a força máxima imposta e as tensões de aderência correspondentes aos deslizamentos iguais a 6 mm.

Tabela 25 – Tensões de aderência obtidas nos ensaios de deslizamento.

Fonte: Autor.

Série	$\sigma_{\text{máximo}}$ (MPa)	$\sigma_{6 \text{ mm}}$ (MPa)
G1-RSC1	0,09	0,07
G1-RSC2	0,13	0,09
G1-RC1	0,23	0,23
G1-RC2	0,14	0,06
G2-QSC1	0,44	0,36
G2-QSC2	0,45	0,35
G2-CSC1	3,56	3,47
G2-CSC2	3,47	3,46
C-RSC1	0,33	0,2
C-RSC2	0,38	0,19
C-RC1	0,39	0,2
C-RC2	0,32	0,18
C-QSC1	0,67	0,46
C-QSC2	0,45	0,24
C-CSC1	2,99	2,71
C-CSC2	2,48	2,13
C-CSC3	3,05	2,99

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após avaliar a influência do comprimento dos perfis tubulares na aderência entre o aço e o concreto ensaiados na fase preliminar, concluiu-se que:

- Os comportamentos entre os corpos de prova de cada série estudada são similares entre si, diferenciando um do outro praticamente apenas no que diz respeito à força máxima imposta para iniciar o deslocamento do concreto no interior do tubo. Pode-se observar a perda da aderência química no momento em que se apresenta o início do deslocamento relativo do concreto até a força máxima. Depois de atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, definem o que se pode chamar de mecanismo parcial de atrito, tal como definem Parsley *et al.* (2000). Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, nota-se que o comportamento de cada corpo de prova é caracterizado por um ramo suavemente descendente até um nível praticamente constante, demonstrando diminuição da força aplicada com a diminuição da área de contato entre os materiais.
- Os perfis circulares apresentaram os valores mais elevados de força máxima aplicada nas três séries de corpos de prova.
- Os perfis de seção quadrada apresentaram os valores mais baixos de força máxima aplicada quando comparados com os perfis de seções circulares e retangulares. Entretanto, houve uma exceção no corpo de prova CP-350-3, não havendo ainda explicações para esse fenômeno.
- A tensão de aderência foi evidentemente influenciada pela área de confinamento do concreto. O perfil com menor área de confinamento foi o que apresentou a maior tensão de aderência. Os valores de tensão de aderência nos perfis

quadrados apresentaram-se inferiores quando comparados com os perfis circulares e retangulares.

- A influência do comprimento dos modelos experimentais foi mais expressiva nos corpos de prova de seção circular. Verificou-se que para os três comprimentos escolhidos (150 mm, 250 mm e 350 mm), o corpo de prova de menor comprimento foi o que apresentou maior resistência ao deslizamento. Entretanto, nos corpos de prova quadrados e retangulares, a influência do comprimento foi mais evidente nas resistências ao deslizamento dos modelos que possuíam 150 milímetros e 250 milímetros.

Após avaliar a aderência entre o aço e o concreto em perfis tubulares preenchidos com concreto geopolimérico e com concreto convencional ensaiados experimentalmente, O presente trabalho concluiu que:

- O concreto geopolimérico confeccionado com o material da empresa Wincret Design Concrete Products LTDA apresenta características de um material alcalinamente ativado. No entanto, os ensaios de caracterização indicaram que o material apresenta uma calcinação incompleta, sendo identificado no FTIR a vibração entre 3695 cm^{-1} e 3660 cm^{-1} descrevendo um grupo de hidroxilas que indicam uma conversão incompleta de caulim a metacaulim no processo de calcinação (Catauro *et al*, 2015).
- Os perfis preenchidos com concreto geopolimérico e com concreto convencional apresentaram o comportamento observado por vários autores (SHAKIR-KHALIL (1993); PARSLEY *et al.* (2000) SCHNEIDER (1998); SHANMUGAM & LAKSHMI (2001); HAN *et al.*, (2014); TAO *et al.*, (2016))) que estudaram pilares misto de aço e de concreto. Observou-se a perda da

aderência química no momento em que se apresenta o início do deslocamento relativo do concreto até a força máxima. Depois de atingido este estágio, a aderência mecânica somada ao confinamento promovido pelo tubo, definem o que se pode chamar de mecanismo parcial de atrito. Ainda com a presença da aderência mecânica e do mecanismo parcial de atrito, nota-se que o comportamento de cada corpo de prova, em sua maioria, é caracterizado por um ramo descendente até um nível praticamente constante.

- Os perfis de seção transversal circular apresentaram valores mais elevados de força máxima aplicada quando comparados com os perfis de seção transversal quadrada e retangular. Este fenômeno foi evidente em todas as séries de corpos de prova ensaiados.
- A tensão de aderência foi evidentemente influenciada pela área de confinamento do concreto. O perfil com menor área de confinamento foi o que apresentou a maior tensão de aderência.
- Para os corpos de prova preenchidos com concreto geopolimérico, o decréscimo do carregamento após atingido o estágio da perda da aderência química não foi tão acentuado quando comparado com o comportamento dos perfis preenchidos com concreto convencional.
- A perda da aderência química nos perfis tubulares circulares preenchidos com concreto geopolimérico ocorre para forças maiores quando comparada com os perfis tubulares circulares preenchidos com concreto convencional.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, O.; R. B. CALDAS; H. M. S. OLIVEIRA E R. H. FAKURY, 2015, Estudo de conectores Crestbond em pilares mistos preenchidos com concreto. Revista da Estrutura de Aço. Centro Brasileiro da Construção de Aço, Rio de Janeiro, v. 4, n. 3, p. 182, dezembro 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ANBT NBR 8800: Estruturas mistas de aço e concreto: origem, desenvolvimento e perspectivas: Rio de Janeiro: 2008.
- BELL, J.; GORDON, M.; KRIVEN, W. M. Use of Geopolymeric cements as a refractory adhesive for metal and ceramic joins. Advances in Ceramic Coatings and Ceramic-Metal Systems: 29th International Conference of Advanced Ceramics and Composites, Florida, v. 26, n. 3, 2005.
- CAMPOLINA, B.M. Estudo da aderência entre aço e concreto em pilares tubulares mistos preenchidos-uma análise experimental e computacional. 2008. 197 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- CARDOSO, H. S. Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto. 2014. 182 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- CASTEL, A; FOSTER, S. Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. Cement and Concrete Research, v. 72, p. 48-53, 2015.
- MICHELINA, C; FERDINANDO, P; GIUSEPPE, L; FLAVIA, B. Geopolymer/PEG Hybrid Materials Synthesis and Investigation of the Polymer Influence on Microstructure and Mechanical Behavior. Materials Research, n. AHEAD, p. 698-705, 2015.
- CHENG, T. W.; CHIU, J. P. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. Minerals Engineering, v. 16, n. 3, p. 205-210, 2003.
- DAVIDOVITS, J. Global Warning Impact on the Cement and Aggregates Industries. In: World Resource Review. Institut Géopolymère, Saint-Quentin, Vol. 6, n. 2, P263-278, 1994.
- DAVIDOVITS, J. Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. In: GEOPOLYMER 2002 CONFERENCE, 2002, Melbourne.

- DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry & Applications. 3.ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, Julho 2011, 612 p.
- DAVIDOVITS, J. Geopolymer Cement, a review. Geopolymer Institut, Saint-Quentin, France, 2013.
- DA SILVA, R. D. Estudo da aderência aço – concreto em pilares mistos preenchidos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2006.
- DEB, PARTHA SARATHI; NATH, PRADIP; SARKER, PRABIR KUMAR. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design* (1980-2015), v. 62, p. 32-39, 2014.
- DE OLIVEIRA. Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, vol. 65, no 12, p. 2103-2110.
- P. DUXSON; J.L. PROVIS; G.C. LUKEY; J.S.J. VAN DEVENTER, The role of inorganic polymer technology in the development of "green concrete". *Cement and Concrete Research*, Vitoria, n. 37, p. 1590, Agosto 2007.
- P. DUXSON; A. FERNANDEZ, J; J. L. PROVIS; G. C. LUKEY; A. PALOMO; J. S. J. VAN DEVENTER. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2004). ENV 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels.
- FENG, D; PROVIS, J; VAN DEVENTER, J. Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers. *Journal Am. Ceram. Soc.*, vol. 95, 565–572, 2012.
- GLUKHOVSKY, V. D. Durability of Concrete. Aspect of admixtures and industrial products. Swedish Council for Building Research, Gothengurg, Sweden, p. 53-62, 1989.
- GONÇALVES, D.K. Síntese e caracterização de cimentos geopoliméricos comerciais. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- HAN, ; LI, W; BJORHOVDE, R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, vol. 100, p. 211-228.

- ISLAM; U.J. ALENGARAM; M.Z. BIN JUMAAT; I.I. BASHAR. The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. *Materials & Design*, v. 56, p. 833-841, 2014.
- JOHANSSON, M; GYLLTOFT, K (2002). Mechanical Behavior of Circular Steel–Concrete Composite Stub Columns. *Journal of Structural Engineering* 2002.128:1073-1081.
- KOTOVA, O. B., SHUSHKOV, D. A., KOTOVA, E. L., SIMAKOVA, Y. S., & POPOVA, E. V. Zeolite Synthesis as Potential Application of Coal Fly Ash. In: XVIII International Coal Preparation Congress. Springer International Publishing, 2016. p. 321-326.
- KRÓL, M.; MINKIEWICZ, J.; MOZGAWA, W. IR Spectroscopy studies of zeolites in geopolymeric materials derived from kaolinite. *Journal of Molecular Structure*, v. 1126, p. 200-206, 2016.
- LUNA-GALIANO. Properties of fly ash and metakaolín based geopolymer panels under fire resistance tests. *Materiales de Construcción*, v. 65, n. 319, p. 059, 2015.
- NG, T; AMIN, A; FOSTER, S. The behaviour of steel-fibre-reinforced geopolymer concrete beams in shear. *Magazine of Concrete Research*, v. 65, n. 5, p. 308-318, 2013.
- OSÓRIO, P. Conceção de um Saferoom Anti-Tornado em Betão Geopolimérico. 2006. 204 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia - Universidade Do Minho. Guimarães, 2006, Portugal.
- PARSLEY, M. A; YURA, J. A; JIRSA, JAMES O. Push-out behavior of rectangular concrete-filled Steel tubes. Composite and hybrid systems. American Concrete Institute, p. 87-107, 2000.
- PROVIS, J; VAN DEVENTER, J. Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. Elsevier, 2009.
- ROEDER, C; CAMERON, B; BROWN, C. Composite action in concrete filled tubes. *Journal of structural engineering*, 1999, vol. 125, no 5, p. 477-484.
- ROSSI, N. Resistência de aderência concreto-aço: Efeitos da resistência à compressão do concreto e do comprimento de aderência. 2002. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- SCHNEIDER, S. Axially loaded concrete-filled steel tubes. *Journal of structural Engineering*, v. 124, n. 10, p. 1125-1138, 1998.

- SEVERO, C. G. S; D. L. Costa; I. M. T. Bezerra; R. R. Menezes; G. A. Neves. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 8, n. 2, 2013b.
- SHAKIR-KHALIL, H. Pushout strength of concrete-filled steel hollow sections. *The Structural Engineer*, V. 71, n.13, p. 231, July. 1993.
- SHANMUGAM, N; 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.
- SOMMA, G; PIERETTO, A; DASSIE, A. Steel to Concrete Bond Transferring in CFST Columns Connected to Beams through the Concrete. *En Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2016. p. 513-520.
- TAO, Z; TIAN-YI, S; BRIAN, U; LIN-HAI, H. Bond behavior in concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 120, p. 81-93, 2016.
- TORGAL, F; GOMES, J.; JALALI, S. Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ambiental ao cimento Portland no contexto da economia do carbono. 2005.
- VERÍSSIMO, G. S. Desenvolvimento de um Conector de Cisalhamento em Chapa Dentada para Estruturas Mistas de Aço e Concreto e Estudo do seu Comportamento. 2007. 290 f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- XU, C; HUANG C; JIANG D; SONG Y. Push-out test of pre-stressing concrete filled circular steel tube columns by means of expansive cement. *Construction and building materials*, 2009, vol. 23, no 1, p. 491-497.
- LI, Z; D, ZHU; ZHANG, Y. Development of sustainable cementitious materials. In: *Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology*, Beijing, China. 2004. p. 55-76.

8. ANEXOS

8.1 Análise granulométrica da brita.

MATERIAL: BRITA 0		DATA DE EXECUÇÃO DO ENSAIO: 18/10/2016		18/10/2016	
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA		Módulo de Finura	Diâmetro Máx Característico (mm)	Fator Granulométrico	
		-	9,5	-	
PENEIRAS (mm)	AMOSTRA Nº 1		AMOSTRA Nº 2		Límites Granulométricos (NBR -7211)
	Material Retido (g)	% Retida	Material Retido (g)	% Retida	
76	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-
38	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-
12,5	27,00	0,54	34,25	0,69	0,61
9,5	604,25	12,08	627,00	12,61	12,34
6,3	2008,00	40,13	2216,75	44,57	55,31
4,8	1347,75	26,94	1091,50	21,95	79,75
2,4	956,75	19,12	861,50	17,32	97,97
1,2	20,00	0,40	43,75	0,88	98,61
0,6	1,00	0,02	12,00	0,24	98,74
0,3	0,50	0,01	4,75	0,10	98,79
0,15	0,75	0,01	9,00	0,18	98,89
Fundo	37,25	0,74	73,25	1,47	100,00
TOTAL	5003,25	100,00	4973,75	100,00	-

8.2 Análise granulométrica da areia.

MATERIAL: AREIA		DATA DE EXECUÇÃO DO ENSAIO: 18/10/2016				
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA		Módulo de Finura	Diâmetro Máx Característico (mm)		Fator Granulométrico	
		2,01	1,2			
PENEIRAS (mm)	AMOSTRA Nº 1		AMOSTRA Nº 2		AMOSTRA MEDIA	
	Material Retido (g)	% Retida	Material Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Límites Granulométricos AREIA FINA (NBR -7211)
76	-	-	-	-	-	
50	-	-	-	-	-	
38	-	-	-	-	-	
32	-	-	-	-	-	
25	-	-	-	-	-	
19	-	-	-	-	-	
12,5	-	-	-	-	-	
9,5	-	-	-	-	-	
6,3	-	-	-	-	-	
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0-10
2,4	18,50	1,85	17,80	1,78	1,82	0-15
1,2	99,40	9,94	98,30	9,84	9,89	0-25
0,6	225,50	22,55	224,30	22,45	22,50	21-40
0,3	310,00	31,00	315,40	31,57	31,29	60-88
0,15	218,10	21,81	219,90	22,01	21,91	90-100
Fundo	128,40	12,84	123,30	12,34	12,59	100,00
TOTAL	999,90	100,00	999,00	100,00	100,00	-