



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM
FIBRA DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA

ROBSON KEL BATISTA DE LIMA

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício

Co-orientador: Prof. MSc. Leovegildo Douglas Pereira de Souza

Campina Grande – PB

Março, 2018

ROBSON KEL BATISTA DE LIMA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM
FIBRA DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande –
UFCG, para encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplicio

Campina Grande – PB

Março, 2018

ROBSON KEL BATISTA DE LIMA

**“ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO
COM FIBRA DE LIGA COM MEMORIA DE FORMA”**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande –
UFCG, para encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação em
Engenharia Civil.

Aprovada em: _____ de _____ de _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. - Marcos Antônio de Souza Simplício - UFCG

(Presidente - Orientador)

Prof. MSc. Leovegildo Douglas Pereira de Souza

(Co-orientador – UFCG)

Prof. Dr. – Milton Bezerra das Chagas Filho

(Membro interno – UFCG)

Com amor, à minha mãe Gizelda e minha namorada Débora, que não mediram esforços para me auxiliarem sempre que possível nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo que tem proporcionado em minha vida, todo o aprendizado e crescimento no decorrer de todos esses anos, traçando sempre o melhor caminho a seguir, não necessariamente o mais fácil.

À minha mãe, Gizelda Batista de Lima, que sempre foi minha grande inspiração e meu porto seguro, que apesar de qualquer adversidade, estava do meu lado, sempre se dedicando e dando o melhor de si aos seus filhos.

À toda minha família, que sempre esteve lá quando precisei, em qualquer situação acreditando e sempre me apoiando, com todo amor e atenção que precisei.

À minha namorada, Débora Rodrigues Soares, que sempre se fez presente quando era possível, se dedicando e me ajudando de todas as formas. Quem estava do meu lado, me apoiando e me dando força durante esse trabalho.

A meu grande amigo, Kaydson Ribeiro de Melo Filho, que sempre esteve ao meu lado, que sempre acreditou e me deu força pra tudo que eu fizesse. Onde sempre pude contar nos momentos mais difíceis.

A meu amigo, Joab Kleber Lucena Machado, por toda a força e ajuda durante boa parte da graduação. Com quem pude crescer tanto profissionalmente como pessoalmente, onde pude me inspirar em muitos momentos, com sua responsabilidade e dedicação.

Ao meu Co-orientador e amigo, Leovegildo Douglas Pereira de Souza, que além de ser uma grande pessoa é um excelente profissional, onde sempre foi solícito em todas as situações, sempre acreditando em mim e tentando tirar o meu melhor em tudo que fazia.

Ao Professor Marcos Antônio de Souza Simplício, que me ajudou quando solicitado com minha pesquisa e fez com que ela fosse possível, mesmo com tantas dificuldades.

À equipe do LaMMEA, que me deu suporte para que fosse possível essa pesquisa, em especial, Paulo César Sales da Silva, que se mostrou muito solícito em tudo que eu precisasse, acreditando que minha pesquisa seria possível, me dando todo o suporte e compartilhando de seu conhecimento quando necessário.

À equipe da ATECEL, Iuri e professor Edmar. Onde pude aprender e vivenciar muito da engenharia posta em prática. Onde por muitas vezes me deu o suporte para estudar e fazer

projetos. Mas em especial, Gladstone que além de um grande engenheiro e meu chefe, se mostrou um grande amigo, me ensinando muito com seus conselhos de vida e de engenharia.

A todos os funcionários e técnicos que fizeram possível todos os ensaios serem realizados da melhor e mais rápida forma possível.

Aos meus amigos de graduação, Gutemberg, Amanda, Andréa, Breno e Raul agradeço por todas as boas conversas e momentos de aprendizagem. Em especial à Mayara, que sempre se mostrou uma grande amiga quando necessário, onde pude contar em vários momentos difíceis e trocar muitas risadas.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta jornada.

RESUMO

Sendo o concreto um dos materiais de construção mais utilizados na construção civil, vê-se nele uma necessidade da realização de estudos mais aprofundados visando a melhoria de suas propriedades básicas de resistência, principalmente, através de adições de outros materiais que podem contribuir significativamente para seu uso, como fibras e aditivos químicos. Tendo isso em vista, o seguinte estudo pretende analisar a resistência à compressão dos corpos de prova de concreto com a adição de ligas de memória de forma e sua viabilidade de utilização em obras de construção civil. Onde foram feitas as devidas análises das propriedades de cada componente do concreto. Foram encontradas as temperaturas de transformação de fase, determinado a curva tensão x deformação e a composição química da liga de memória de forma. Devido a propriedade de recuperação de forma dessa liga quando submetido à sua temperatura de recuperação de forma (“ativação”), ela foi usada como reforço para o concreto de duas formas distintas, sendo a primeira simplesmente cortada no tamanho desejado e acrescentada na massa de concreto e a segunda, sendo previamente deformada e acrescentada na massa, para depois da cura ser aquecida acima da temperatura de “ativação” e gerar uma pretensão no interior do corpo de prova. Foram obtidos os resultados da resistência à compressão uniaxial desses corpos de prova e de um modelo de controle sem a liga. Foi possível verificar que os corpos com os fios ativados tiveram resistência acima dos com fios não ativados, no que se notou a funcionalidade da ativação dos fios nos corpos de prova. Mas quando comparados com os corpos de prova do controle, eles tiveram uma resistência inferior, mas com modelos de ruptura bem distintos. Onde os com fios ativados ainda conseguiam resistir à cargas elevadas mesmo depois do seu rompimento, devido a sua recuperação de forma da liga.

ABSTRACT

Since concrete is one of the building materials most used in civil construction, it is necessary to carry out further studies aimed at improving its basic resistance properties, mainly through additions of other materials that can contribute significantly to its construction. use, such as fibers and chemical additives. With this in view, the following study intends to analyze the compressive strength of concrete specimens with the addition of shape memory alloys and their feasibility of use in civil works. Where were made the proper analysis of the properties of each component of the concrete. The phase transformation temperatures were determined, the stress x strain curve and the chemical composition of the shape memory alloy were determined. Due to the shape recovery property of this alloy when subjected to its shape recovery temperature ("activation"), it was used as reinforcement for the concrete in two distinct ways, the first being simply cut to the desired size and added to the mass of concrete and the second, being previously deformed and added in the mass, so that after the curing is heated above the "activation" temperature and generate a pretension inside the specimen. The results of the uniaxial compression strength of these specimens and of a control model without the alloy were obtained. It was possible to verify that the bodies with the activated wires had resistance above the ones with non activated wires, in which the functionality of the activation of the wires in the specimens was noticed. But when compared to the test specimens of the control, they had a lower resistance, but with very different models of rupture. Where those with activated wires could still withstand high loads even after their breakage due to their recovery from alloy form.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Maquinário utilizado para ensaio de compressão simples	7
Figura 2 - Curva de Gauss para resistência do concreto a compressão	7
Figura 3 - Influência da relação água/cimento na resistência a compressão do concreto.....	9
Figura 4 - Influência da relação água/cimento e ar incorporado na resistência do concreto ...	10
Figura 5 - Influência da relação água/cimento e ar incorporado no consumo do concreto	10
Figura 6 - Transformação da martensita e austenita	16
Figura 7 - Representação esquemática do efeito memória de forma	16
Figura 8 - Diagrama Tensão-Deformação-Temperatura descrevendo o EMFS de uma LMF	17
Figura 9 - Comparação da liga Ni-Ti com outros materiais	18
Figura 10 - Comportamento tensão-deformação de uma LMF superelástica.....	19
Figura 11 - Gráfico granulométrico da areia.....	21
Figura 12 - Gráfico granulométrico da brita	21
Figura 13 - Molde cilíndrico de dimensão básica de 150mm	24
Figura 14 - Haste de socamento (Unidade em mm)	24
Figura 15 - Fios de Nitinol.....	25
Figura 16 - Ensaio MEV - 500 e 1000x.....	25
Figura 17 - Sistema para o alongamento dos fios	26
Figura 18 - Gráfico do ensaio EDS do NITINOL.....	28
Figura 19 - Gráfico da resistividade da liga por RET	29
Figura 20 - INSTRON - 5582	30
Figura 21 - Gráfico Tensão-deformação à 30°C.....	30
Figura 22 - INSTRON - 5582 com o forno acoplado	31
Figura 23 - Gráfico Tensão-deformação à 100°C.....	32
Figura 24 - CP rompido com fibra ativada	35
Figura 25 - CP rompido com fibra ativada	Erro! Indicador não definido.
Figura 26 - Termômetro a laser usado para medir a temperatura do concreto ao fazer o ensaio	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da areia	21
Tabela 2 - Características da brita.....	22
Tabela 3 - Tabela resumo de Nitinol.....	23
Tabela 4 - Temperaturas de transformação do Nitinol	29
Tabela 5 - Resultados - Concreto sem fibra.....	33
Tabela 6 - Resultados - Concreto com fibra não ativada	34
Tabela 7 - Resultados - Concreto com fibra ativada.....	35
Tabela 8 - Resumo das temperaturas internas e externas dos corpos de prova	37

SUMÁRIO

1.0	– INTRODUÇÃO	1
2.0	– OBJETIVO	3
2.1	– Objetivo Geral	3
2.2	– Objetivos Específicos	3
3.0	– REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	– Propriedades mecânicas do concreto	4
3.1.1	– Resistência mecânica do concreto	5
3.1.2	– Resistência à compressão simples	6
3.1.3	– Características e proporções dos materiais	8
3.1.3.1	– Relação água/cimento	8
3.1.3.2	– Ar incorporado	9
3.1.3.3	– Tipo de cimento	11
3.1.3.4	– Agregado	11
3.1.3.5	– Água de amassamento	12
3.1.3.6	– Aditivos e adições	12
3.1.4	– Reforço do concreto	12
3.1.4.1	– Reforço do concreto com fibras curtas	13
3.2	– Efeito memória de forma	14
3.3	– Superelasticidade	18
3.4	– Aplicação das ligas de Ni-Ti na construção civil	19
4.0	– MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1	– Materiais	20
4.1.1	– Características do concreto	20
4.1.2	– Nitinol utilizado	22
4.2	– Métodos	23
5.0	– RESULTADOS	28
6.0	– CONCLUSÃO	38
7.0	– BIBLIOGRAFIA	39

1.0 – INTRODUÇÃO

O concreto moderno, utilizado atualmente para a construção dos mais diversos tipos de estrutura é fruto do trabalho de inúmeros homens, que durante milhares de anos observaram a natureza e se dedicaram no sentido de aperfeiçoar materiais, técnicas, teorias e formas estruturais. Desta forma, constata-se que a história do concreto não começou no século passado, mas com a própria civilização humana, inicialmente pelos romanos com a utilização de cimento pozolana natural e cal. Até o desenvolvimento do cimento Portland por Joseph Aspdin, que se tornou possível construções que dispunham de mais resistência e segurança.

Além disto, sabe-se da importância do concreto para grande parte das edificações no Brasil, devido a suas propriedades, economia e facilidade de execução. Isso justifica a grande procura pelo melhoramento de suas propriedades através do uso de materiais alternativos para tal fim.

Com essa diversidade de materiais, a utilização de fibras para reforçar os materiais é uma solução para diversos problemas na construção civil atualmente. Esses compósitos possuem maior ductilidade e tenacidade que os materiais tradicionais e com eles é possível produzir componentes mais leves do que os convencionais, mas com elevado desempenho mecânico.

Devido a essa necessidade de melhoramento das propriedades básicas de resistência do concreto, como à esforços de tração, vem sendo estudado o uso das ligas de memória de forma (LMF), utilizando suas propriedades de ductilidade, elasticidade e resistência a temperatura, para ser atribuída essas características ao concreto em suas várias utilizações.

Segundo Lecce e Concilio (2015), o uso de ligas de memória de forma (LMF) expandiu-se cada vez mais nas últimas décadas. Muitos pesquisadores realizaram atividades intensivas com o objetivo de explorar dispositivos e aplicativos inovadores, fazendo uso desses materiais inteligentes. De fato, o número de aplicações comerciais está crescendo a cada ano, com o maior segmento de aplicativos do mercado representado por atuadores e motores. O mercado global de materiais inteligentes foi de aproximadamente US\$ 19,6 bilhões em 2010; Estima-se que ele se aproxima de US\$ 22 bilhões em 2011, até mais de US\$ 40 bilhões até 2016, com uma taxa de crescimento anual composta de 12,8% entre 2011 e 2016.

Os LMFs possuem características físicas e mecânicas que os tornam candidatos bem-sucedidos para uso em aplicações de engenharia estrutural, como sua utilização para a amortecimento de vibrações estruturais. Exemplo disso é que as LMFs desempenham um papel fundamental no desenvolvimento e implementação de materiais / dispositivos inteligentes, que podem ser integrados em estruturas para fornecer funções como detecção, dissipação de energia, atuação, monitoramento, auto-adaptação e cura de estruturas. Nas últimas décadas, os esforços intensivos de pesquisa foram concentrados no campo da engenharia estrutural, com o objetivo de empregar sistemas de engenharia inteligente em aplicações de engenharia civil, com especial ênfase no controle de estruturas sísmicas. (LECCE e CONCILIO, 2015)

2.0 – OBJETIVO

2.1 – Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento mecânico do concreto, submetido à compressão uniaxial, reforçado com fibras utilizando ligas de memória de forma (NITINOL) para o reforço do concreto no estado martensítico e Austenítico (ativado).

2.2 – Objetivos Específicos

- Obter a curva tensão x deformação dos fios de Nitinol.
- Caracterizar da composição química da liga de Nitinol utilizada.
- Analisar a temperatura de transformação do Nitinol.
- Aquisição e análise dos resultados da compressão obtidos.

3.0 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Propriedades mecânicas do concreto

O concreto é um material de construção proveniente da mistura, em proporção adequada, de um aglomerante (cimento), agregados e água. Também sendo empregados aditivos e adições em sua composição. Possuindo aplicações diversas além da estrutural, como: pavimentação, canalização, paredes, fundações, entre outros.

Para melhor caracterização dos principais parâmetros do concreto, tais como sua resistência e durabilidade, a proporção entre os materiais que o constituem é extremamente importante. A mistura entre os materiais constituintes é conhecida também por traço ou dosagem.

Os aglomerantes são geralmente materiais pulverulentos com a finalidade de unir outros materiais. No concreto, em geral, é empregado o cimento Portland que, por ser um aglomerante hidráulico, reage com a água e endurece com o tempo.

Os agregados são partículas minerais que aumentam o volume da mistura, que além de reduzir o seu custo, eles contribuem para a estabilidade volumétrica do produto final. Se dividem em dois grupos, sendo eles os miúdos ($0,075\text{mm} < \phi < 4,8\text{mm}$) e os graúdos ($\phi > 4,8\text{mm}$), sendo mais utilizados a areia como miúdo e as pedras britadas como graúdo.

A mistura entre a água e o cimento, também é conhecida como pasta, e quando há água em excesso, é chamado de nata. O acréscimo do agregado miúdo à pasta, denominamos de argamassa. E por fim, com o acréscimo do agregado graúdo à argamassa, denomina-se de concreto simples.

O concreto simples possui peso específico em torno de 24 kN/m^3 , já no concreto leve sua massa específica é em torno de 19 kN/m^3 e no concreto pesado está em torno de 35 kN/m^3 e 55 kN/m^3 . Os tipos de agregados usados têm influência direta para a determinação de sua massa específica, como o concreto leve, que utiliza agregados leves em sua composição, como isopor, vermiculita, entre outros, e para o concreto pesado são utilizados agregados especiais, como a hematita. Sendo essa propriedade de fundamental importância para o cálculo do peso próprio da estrutura.

Outro fator de grande importância para a caracterização do concreto é sua permeabilidade e absorção de água que são afetadas por fatores como materiais constituintes: água (quantidade e pureza), cimento (quantidade, finura e composição), agregados (quantidade, tipos, graduação, impurezas e umidade) e aditivos (quimicamente ativos ou inertes); métodos de preparação (mistura, lançamento, adensamento e acabamento); tratamento (idade, cura e condições de ensaio).

A deformação do concreto se dá sobre a ação de vários fatores, como principalmente a hidratação do cimento, solicitação mecânica, variações térmicas da quantidade de água no concreto. As deformações causadas pela hidratação do cimento são causadas no processo de cura do concreto. As solicitações mecânicas são responsáveis por dois tipos de deformação, a imediata e a lenta, que se dão logo após a aplicação do carregamento e ao longo do tempo com a manutenção do carregamento. O concreto também pode ser deformado pela ação de altas temperaturas, fazendo com que a quantidade de água interfira na sua resistência. Devido à baixa ductilidade do concreto, essas deformações podem resultar na diminuição da resistência da estrutura.

A diminuição da resistência pode acarretar vários problemas estruturais, entre eles, pode-se destacar o fissuramento do elemento estrutural. Vários fatores podem contribuir para este fenômeno, assim como a resistência do concreto e do aço, variações dimensionais devidas à retração e espessura da armadura. Elas geralmente aparecem nas zonas de tração onde são diferentes as deformações do aço e do concreto, o que pode ser minimizado ou evitado com a utilização de concretos especiais, como o concreto com a adição de fibras, minimizando assim a macro e micro fissuração.

3.1.1 – Resistência mecânica do concreto

A resistência na maioria dos casos é a propriedade fundamental do concreto, pois através dela pode-se indicar a sua qualidade, se foi bem dosado nos parâmetros pré-definidos em projeto a fim de obter os parâmetros desejados.

Os ensaios de resistência do concreto são normalmente baseados em corpos de prova curados em condições específicas de temperatura e umidade por um período de sete, quatorze e vinte e oito dias. Em estruturas usuais são utilizadas resistências à compressão da ordem de

20 a 40 MPa, apesar de que concretos de alta resistência de até 130 MPa são produzidos atualmente, (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

O concreto tem uma estrutura interna altamente complexa e heterogênea, sendo esta a dificuldade de sua compreensão. Entretanto, o conhecimento da estrutura e das propriedades individuais dos materiais constituintes e da relação entre eles auxilia a compreensão das propriedades dos vários tipos de concreto. (Pinheiro, 2010)

No mercado podem-se encontrar vários tipos de cimento que irão compor a argamassa e o concreto de acordo com a necessidade do projeto. Por meio da dosagem pode-se modificar as características do concreto, como sua trabalhabilidade e sua resistência característica. Também é possível usar aditivos químicos, quando é necessário alterar suas propriedades tanto no estado fresco quanto endurecido, visando ampliar as qualidades e minimizar desvantagens da mistura.

Para um estudo mais detalhado sobre a vida da estrutura, deve-se analisar principalmente as propriedades físicas e químicas dos agregados e das misturas ligantes.

Devido a recentes pesquisas e a utilização de novos aditivos, tornou-se possível a produção de concretos com melhores propriedades como boa trabalhabilidade e alta resistência. A partir destas pesquisas, foi possível, para a construção civil, chegar a outros patamares, possibilitando a execução de prédios mais altos e de melhores propriedades construtivas.

3.1.2– Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples, conhecida como f_c , é a característica mecânica mais importante do concreto para seus diversos tipos de utilização.

Para isso precisa-se estimar esta resistência através de uma análise através de corpos de prova seguindo a norma ABNT NBR 5738/2008– *Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*, para sua preparação e que são ensaiados de acordo com a ABNT NBR 5739/2007 – *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Pode-se ver na Figura 1 como é o modelo de corpo de prova e a prensa para a correta execução do ensaio de compressão simples.

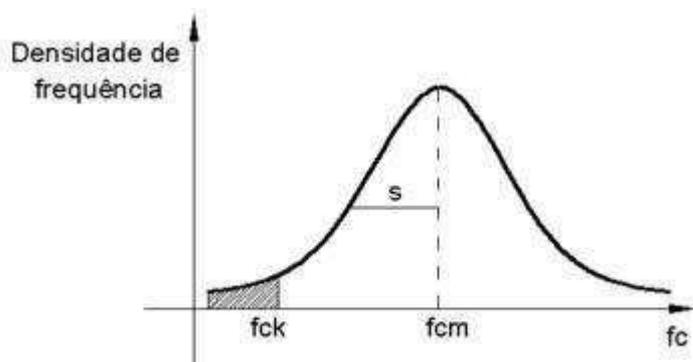
Figura 1 - Prensa utilizado para ensaio de compressão simples



(fonte: emic.com.br)

Com um determinado número de corpos de prova que seja representativo, traça-se um gráfico com os valores obtidos de f_c , versus quantidade de corpos de prova relativos a determinado valor de f_c , também chamada densidade de frequência. A curva obtida para resistência do concreto à compressão respeita a distribuição normal de Gauss, conforme mostrado na Figura 2:

Figura 2 - Curva de Gauss para resistência do concreto a compressão



(Fonte: Estruturas de Concreto, Libânio M. Pinheiro)

Nesta curva pode-se encontrar dois valores de fundamental importância que é a resistência média do concreto à compressão, f_{cm} , e a resistência característica do concreto à compressão, f_{ck} , que são os parâmetros mais importantes para a caracterização da resistência do concreto.

O f_{cm} é a média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos de prova ensaiados, e é utilizado na determinação da resistência característica, f_{ck} , por meio da fórmula:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s$$

O desvio padrão s representa a distância entre a abscissa de f_{cm} e a do ponto de inflexão da curva. O valor 1,65 corresponde ao quantil de 5%, ou seja, apenas 5% dos corpos de prova possuem f_c menor f_{ck} , ou, 95% dos corpos de prova possuem f_c maior ou igual f_{ck} .

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a resposta do concreto não depende apenas do tipo de tensão, mas também de como a combinação de vários fatores afeta a porosidade dos diferentes componentes estruturais do concreto. Os fatores incluem propriedades e proporções dos materiais que formam o traço do concreto, o grau de compactação e as condições de cura. Do ponto de vista da resistência, entre *relação água / cimento e porosidade*, ela é, sem dúvida, o mais importante, porque, independente de outros fatores, afeta a porosidade da matriz da argamassa de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado.

3.1.3 – Características e proporções dos materiais

Antes mesmo de fazer uma mistura de concreto, deve-se fazer uma boa seleção dos componentes adequados e de suas devidas proporções para a obtenção de um produto que deverá atender à resistência especificada. Para isso deve-se ter conhecimento das principais características de cada propriedade que pode ser levada em consideração para uma melhor caracterização da resistência do concreto em estudo.

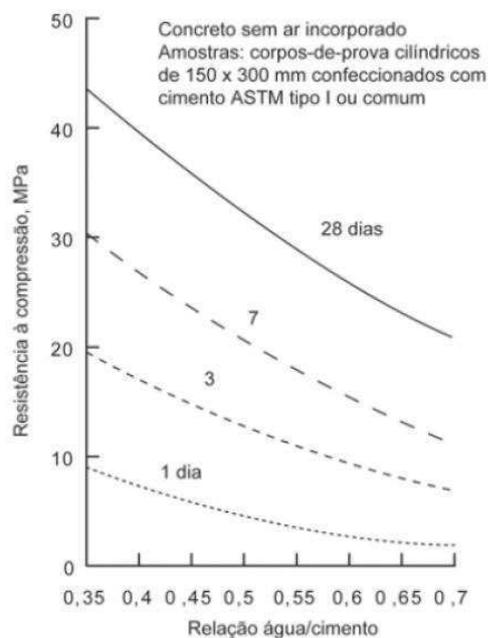
3.1.3.1 – Relação água/cimento

O fator água/cimento é a proporção das quantidades de água e cimento, em massa, na mistura do concreto. E como já foi citado, é fator de grande importância para a sua resistência.

Através de vários estudos realizados, foi analisada a diminuição da resistência do concreto com o aumento da relação água/cimento, que pode ser explicado pelo enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade devido ao

processo de secagem do concreto e o acúmulo de vazios em sua estrutura. Como pode-se ver na figura 3, da relação a/c e sua resistência à compressão, também conhecida como a Lei de Abrams.

Figura 3 - Influência da relação água/cimento na resistência a compressão do concreto

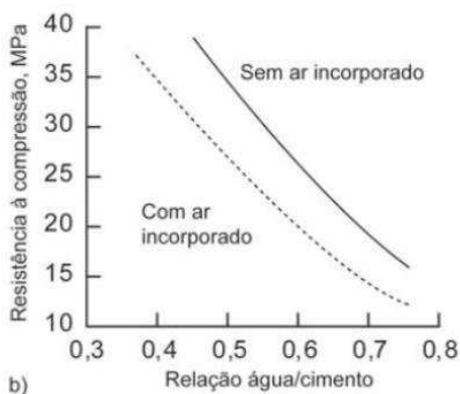


(Fonte: MEHTA E MONTEIRO, 2008)

3.1.3.2 – Ar incorporado

Na maioria dos casos, a relação água/cimento determina a porosidade da matriz da pasta de cimento a um dado grau de hidratação. Entretanto, quando vazios de ar são incorporados ao sistema, ou como resultado do adensamento inadequado ou pelo uso de aditivos incorporadores de ar, também têm efeito de aumentar a porosidade e diminuir a resistência do sistema (MEHTA E MONTEIRO, 2008). A relação numérica desse decréscimo de resistência é mostrada na Figura 4.

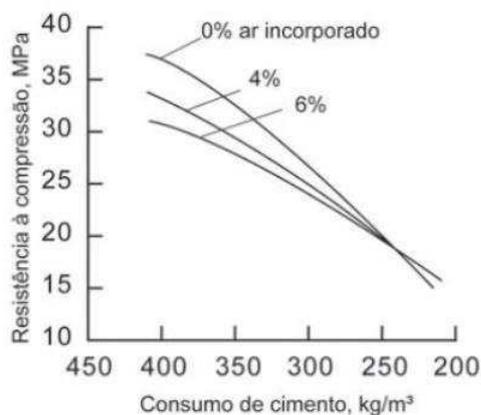
Figura 4 - Influência da relação água/cimento e ar incorporado na resistência do concreto



(Fonte: MEHTA E MONTEIRO, 2008)

Observou-se que o nível da perda de resistência como resultado do ar incorporado não depende apenas da relação água/cimento da mistura do concreto, mas também do consumo de cimento. Em suma, como primeira aproximação, a perda de resistência à incorporação de ar pode estar relacionada ao nível geral da resistência do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008), como mostrada na Figura 5.

Figura 5 - Influência da relação água/cimento e ar incorporado no consumo do concreto



(Fonte: MEHTA E MONTEIRO, 2008)

Ou seja, a uma dada relação água/cimento ou consumo de cimento, o ar incorporado normalmente reduz a resistência do concreto. Para consumos muito baixos de cimento, na verdade, o ar incorporado pode aumentar a resistência.

3.1.3.3 – Tipo de cimento

No mercado da construção civil são disponíveis vários tipos de cimento, tais como Cimento Portland tipos I (CP – I), II (CP – II), III (CP – III), IV (CP – IV) e V (CP – V), além dos resistentes a sulfatos (RS), de baixo calor de hidratação e do cimento branco, os quais diferem entre si principalmente devido às adições que são feitas no processo de moagem.

A temperatura normal o cimento Portland tipo III, que é mais fino, hidrata-se mais rapidamente do que outros tipos. Assim, às primeiras idades da hidratação (por exemplo 1, 3 e 7 dias) e a uma dada relação água/cimento, um concreto contendo cimento Portland tipo III terá uma porosidade mais baixa e, de modo correspondente, uma resistência mais alta. Por outro lado, em comparação aos cimentos Portland tipo I, tipo II e tipo III, as taxas de hidratação e desenvolvimento da resistência com cimentos tipos IV e tipo V e cimentos Portland com escória de alto-forno e pozolânico são mais lentos até 28 dias. Entretanto, as diferenças normalmente desaparecem após essa idade, quando tiverem alcançando um grau de hidratação semelhante (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

3.1.3.4 - Agregado

A resistência do agregado normalmente não é um fator determinante na resistência do concreto porque, com exceção dos agregados leves, a partícula de agregado é muito mais resistente do que a matriz e a zona de transição na interface no concreto.

Porém, há evidências suficientes na literatura existente de que nem sempre este é o caso. A partir de considerações teóricas, pode-se também prever que, independentemente da relação água/cimento, a dimensão, forma, textura superficial e mineralogia das partículas de agregado influenciarão as características da zona de transição na interface e, portanto, afetarão a resistência do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

3.1.3.5 - Água de amassamento

As impurezas na água usada na mistura do concreto, quando excessivas, podem não apenas afetar a resistência do concreto e o tempo de pega, mas também gerar eflorescência (depósitos de sais brancos na superfície do concreto) e causar a corrosão da armadura e do aço protendido. Em geral, a água de amassamento raramente é um fator relevante na resistência do concreto, porque muitas especificações para produzir misturas de concreto exigem a potabilidade da água (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

3.1.3.6 - Aditivos e adições

No mercado é possível encontrar diversos subprodutos cimentícios, que podem ser usados como substituição parcial para o cimento Portland, elas costumam ter um efeito retardador sobre a resistência das primeiras idades. Alguns desses aditivos podem levar a uma redução significativa na porosidade da matriz e da zona de transição na interface. Consequentemente, melhorias consideráveis na resistência final e na estanqueidade do concreto.

3.1.4 - Reforço do concreto

O concreto é um material que resiste bem à compressão, mas apresenta uma resistência à tração muito pequena. Como consequência disso, existe o crescimento de fissuras quando as cargas são aplicadas, ou via retrações do próprio material ou variação de temperatura. Por isso, é recomendado que o concreto deva ser reforçado com fibras para obtermos um melhor aproveitamento estrutural dos materiais que é utilizado.

3.1.4.1 - Reforço do concreto com fibras curtas

Fibras de várias formas e tamanhos são utilizadas atualmente em todo o mundo, produzidas em aço, plástico, vidros e materiais naturais. Contudo, para a maioria das peças estruturais e não estruturais, as fibras de aço são as mais utilizadas, Mehta (1986).

No concreto reforçado com fibras, o volume de adição é muito baixo, menor que 2% em volume, e as fibras atuam como reforço secundário, principalmente para a função de controle de fissuras. Infelizmente, as fibras são pouco utilizadas em aplicações estruturais, apesar da sua eficácia para controlar a abertura de fissuras. Isso ocorre devido ao fato de que maioria dos códigos de projeto estrutural para o concreto baseia-se principalmente na resistência de ruptura do material a compressão. Sendo a principal preocupação a carga de pico que uma estrutura pode suportar, ao invés do comportamento pós-pico (BENTUR; MINDESS, 2007).

De acordo com o FIP-Model Code for Concrete Structure (2010), as fibras podem ser usadas para melhorar o comportamento no estado limite de serviço (ELS), uma vez que podem reduzir o espaçamento e abertura das fissuras, melhorando assim a durabilidade. Fibras também podem ser usadas para melhorar o comportamento no estado limite último (ELU), onde pode substituir parcialmente ou totalmente o reforço convencional.

Uma das principais características das fibras curtas é de possuir um alto módulo de elasticidade e absorver grande nível de tensão, o que faz com que as fissuras não se propaguem na estrutura.

O concreto reforçado com fibras curtas possui grande capacidade portante (se caracteriza pela redistribuição de esforços, mesmo quando fissurado). A vantagem disso é a resistência à fadiga e uma maior durabilidade estrutural, devido à diminuição da entrada de agentes agressivos, Nogueira (2015).

Quando é utilizado fibras como reforço para o concreto, é necessária uma energia suficiente para que a fibra se rompa, o que proporciona ao material um aumento de tenacidade, Bastos e Pinheiro (2000).

Recomenda-se que o concreto com fibra não tenha partículas maiores que 20 mm e de preferência não maior que 10 mm, caso contrário a distribuição uniforme de fibras torna-se difícil de ser alcançada (HANNANT, 2000).

Com o aumento de carga no compósito, as fibras tendem a transferir a tensão adicional para a matriz, através tensões de aderência. Se essas tensões de aderência não excedem a resistência de aderência, pode haver uma fissuração adicional na matriz. Este processo de fissuração múltipla continuará até que haja ou o rompimento da fibra ou o seu arrancamento, devido à perda de aderência local acumulada, Shah (1995).

O aumento da tenacidade é notado pela ação de ponte (deslocamento, deslizamento, arrancamento ou escoamento das fibras) nas micro e macro fissuras da matriz. Esse mecanismo retarda e controla a macro fissuração, além de aumentar a demanda de energia para o avanço da fissura. Ao combinar fibras com a armadura contínua, pelo efeito sinérgico, ambas se tornam mais eficientes. As fibras melhoram a aderência do concreto com a armadura, inibindo a fissuração na região de transferência de forças, Furland-Jr (1995).

3.2 - Efeito memória de forma

O efeito memória de forma é a propriedade que certos materiais adquirem, após tratamento termomecânico, de oscilar entre formas previamente definidas ou mesmo a capacidade de recuperar uma deformação residual, aparentemente acima de seu limite elástico, através de um simples aquecimento, (MOTA, 2002).

Os primeiros estudos sobre o fenômeno do Efeito Memória de Forma surgiram na década de 50 com ligas de Ouro-Cádmio e Índio-Titânio. Na década de 60 aconteceu um grande avanço com o surgimento da liga de Níquel-Titânio e ligas à base de Cobre. (SAADAT, 2002).

Essas ligas são encontradas para uso comercial, principalmente as compostas de Níquel-Titânio (NITINOL). Geralmente na forma de cabos muito finos e bem flexíveis na sua fase de mais baixa temperatura, próximo a temperatura ambiente. Entre as principais utilizações desta liga no mercado, está a utilização para aparelhos ortodônticos, na qual pode-se encontrar com uma maior facilidade, nos tamanhos pré-definidos para o seu uso.

A principal característica deste tipo de liga é a sua capacidade de recuperação da forma original, mesmo após a deformação, por meio de transformações na estrutura cristalina do material, pelo aumento da temperatura, acima da temperatura fim de transformação da martensita para austenita, mostrando-se um material com características bem diferentes das principais ligas para diversos tipos de utilizações.

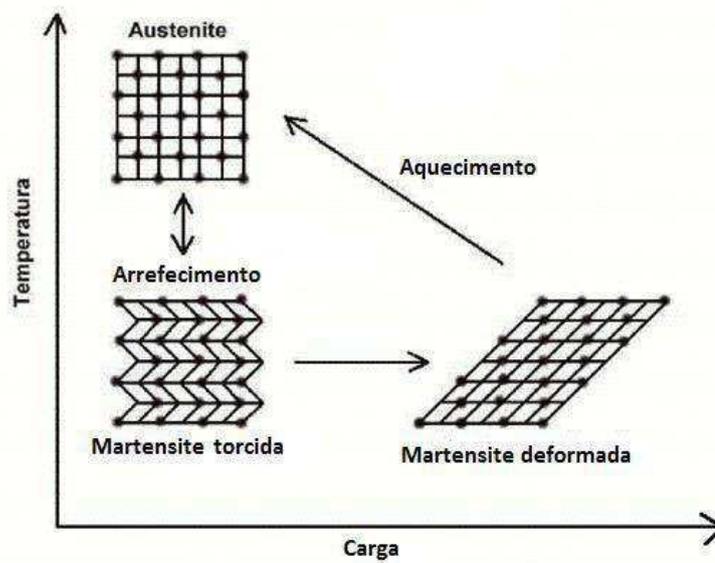
É importante considerar que a definição de estado martensítico e austenítico não se dá da mesma forma dos tratamentos térmicos feitos no aço. A superelasticidade e o efeito de memória de forma são dois aspectos do mesmo efeito, ambos resultantes de um tipo peculiar de transformação cristalina, denominada transformação martensítica-termoelástica (REIS, W.P. 2001.).

Transformações martensíticas-termoelásticas são transformações de estado sólido e a causa dessas transformações ocorre devido à diferença de energia livre, entre as estruturas constituintes envolvidas no processo, o que induz modificações nas ligações químicas, tornando as transformações de fase de caráter essencialmente cristalográfico. (PAIVA, 2004)

Os principais fatores que influenciam na recuperação de forma são: composição química, estrutura inicial, treinamento, tamanho de grão e energia de defeito de falha de empilhamento (NASCIMENTO, 2002).

A recuperação de forma se deve à reversão da martensita induzida termicamente ou mecanicamente: a reversão, martensita $e(hc)$ em austenita $g(cfc)$, que ocorre com o aquecimento (NASCIMENTO, 2002), como pode ser vista na Figura a seguir.

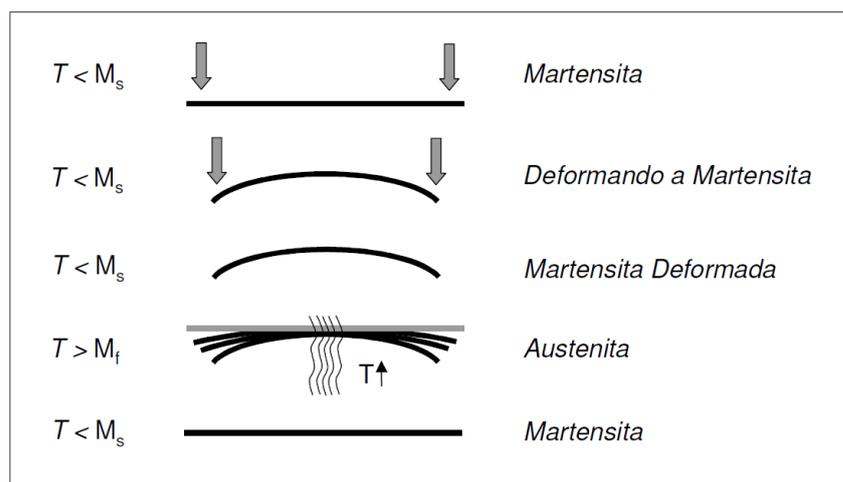
Figura 6 - Transformação da martensita e austenita



(Fonte: NASCIMENTO, 2002)

A liga é deformada a uma temperatura abaixo de M_s (temperatura de início da transformação martensítica) e recupera a sua forma inicial através do aquecimento acima da temperatura crítica M_f (temperatura de fim da transformação martensítica), conforme pode ser observado na Figura 7.

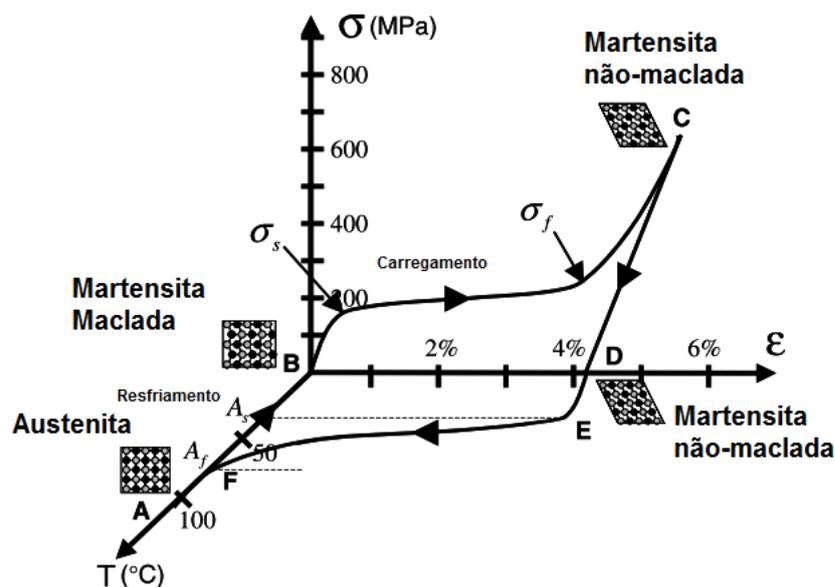
Figura 7 - Representação esquemática do efeito memória de forma



(Fonte: NASCIMENTO, 2002)

Como mostrado na Figura 8, pela a análise da tensão, deformação e temperatura é possível descrever como acontece o efeito memória de forma (EMF), pode-se descrever o fenômeno da seguinte forma: partindo do resfriamento do ponto A para o ponto B, o material que apresentava uma estrutura austenítica passa a apresentar uma estrutura martensítica maclada de auto acomodação (não orientada). Submetendo o material a um carregamento, a estrutura martensítica maclada presente no ponto B inicia seu processo de orientação a partir de uma tensão crítica inicial (σ_s), transformando-se em uma estrutura martensítica não-maclada (ou orientada), finalizando seu processo de orientação a uma tensão crítica final (σ_f). A estrutura martensítica não maclada permanece mesmo após o descarregamento do ponto C ao ponto D, onde é possível checar uma deformação residual considerável. Submetendo o material a um aquecimento sem carregamento mecânico, a transformação de fase reversa tem início quando a partir de quando a temperatura atinge A_s e finaliza na temperatura A_f , onde a estrutura passa a ser completamente austenítica e a deformação residual é completamente recuperada, fazendo com que o material retorne a sua forma inicial. Ao se aplicar um subsequente resfriamento, resultará novamente na formação de uma estrutura martensítica maclada dando início a um novo ciclo do EMF. (OLIVEIRA, 2014)

Figura 8 - Diagrama Tensão-Deformação-Temperatura descrevendo o EMFS de uma LMF

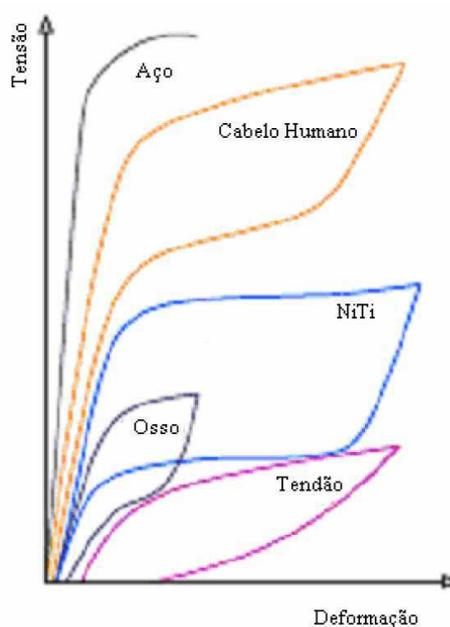


(Fonte: Lagoudas, 2008)

Esse material quando adicionado ao concreto e outros compósitos é capaz de mudar a forma pela qual o material rompe após um aquecimento, além de dotá-lo de uma pseudosuperelasticidade, em que o material é capaz de deformar em média oito por cento a mais do que um compósito que não possua a fibra (MO, 2004).

Pode-se comparar a liga de Ni-Ti com vários outros materiais e verificar pela figura 9 sua elasticidade em relação aos outros materiais.

Figura 9 - Comparação da liga Ni-Ti com outros materiais



(Fonte: NASCIMENTO, 2002)

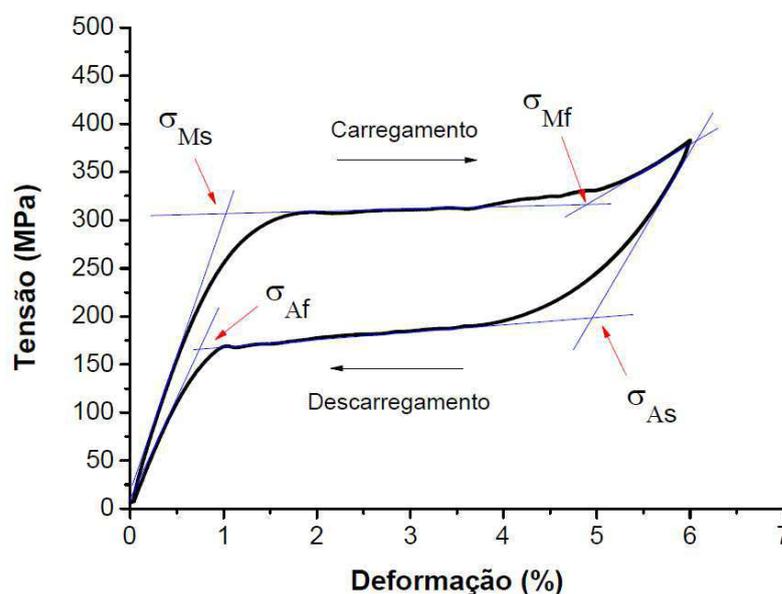
3.3 – Superelasticidade

A superelasticidade é a capacidade que uma LMF apresenta de recuperar grandes níveis de deformação apenas com a retirada do carregamento aplicado. Também conhecido como efeito pseudoelástico, e ocorre exclusivamente quando a LMF se encontra acima de sua temperatura crítica final de transformação austenítica (A_f).

Acima dessa temperatura, quando uma LMF é submetida a um carregamento mecânico a fase austenítica inicia sua deformação elástica até atingir um nível de tensão mecânica crítico, conhecido como tensão crítica de início de transformação martensítica (σ_{Ms}). É nesse nível de tensão que tem o início do patamar superelástico. Após atingir esse patamar a transformação

martensítica se completará ao alcançar a tensão crítica final de transformação martensítica (σ_{Mf}). Nesse ponto, toda a microestrutura presente na LMF é formada por martensita não maclada. Ao iniciar o descarregamento, a LMF inicia a transformação reversa ao atingir a tensão crítica de início de transformação austenítica (σ_{As}) finalizando o processo ao atingir sua tensão crítica final de transformação austenítica (σ_{Af}). O gráfico tensão-deformação apresentado pela Figura 10 mostra uma curva experimental obtida através de um ensaio de tração em que se podem observar as tensões críticas responsáveis pelo início e fim das transformações martensítica e austenítica. (OLIVEIRA, 2014)

Figura 10 - Comportamento tensão-deformação de uma LMF superelástica



(Fonte: OLIVEIRA, 2014)

3.4– Aplicação das ligas de Ni-Ti na construção civil

Segundo MO (2004), existem concretos estruturais que conseguem suportar explosões de ataques terroristas ou desastres naturais e já podem ser encontrados em pesquisas mais recentes, como é o caso de “materiais inteligentes”, onde ligas de Ni-ti ou Nitinol interagem com o concreto.

Segundo NOGUEIRA (2015), esse material resiste a duas formas usuais: a memória de forma que é capaz de mudar a forma de uma amostra rompida após um aquecimento e uma superelasticidade.

Os fios pré tracionados de Nitinol são colocados na massa de concreto. Esse concreto reforçado é aquecido após a sua cura, numa temperatura suficiente para sua mudança de fase martensítica para austenítica, em temperaturas entre 80 e 130°C, que de acordo com Cánovaz (1988), temperaturas de até 200°C não ocorrem reduções significativas de resistência. Após esse procedimento, o concreto adquire um acréscimo de amortecimento e uma melhor capacidade de absorver impacto. O que também pode ser classificado como um acréscimo de uma protensão no concreto, atribuindo as características das ligas de Ni-Ti à estrutura estudada.

4.0 – MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os materiais e métodos utilizados para a realização dos ensaios para a pesquisa.

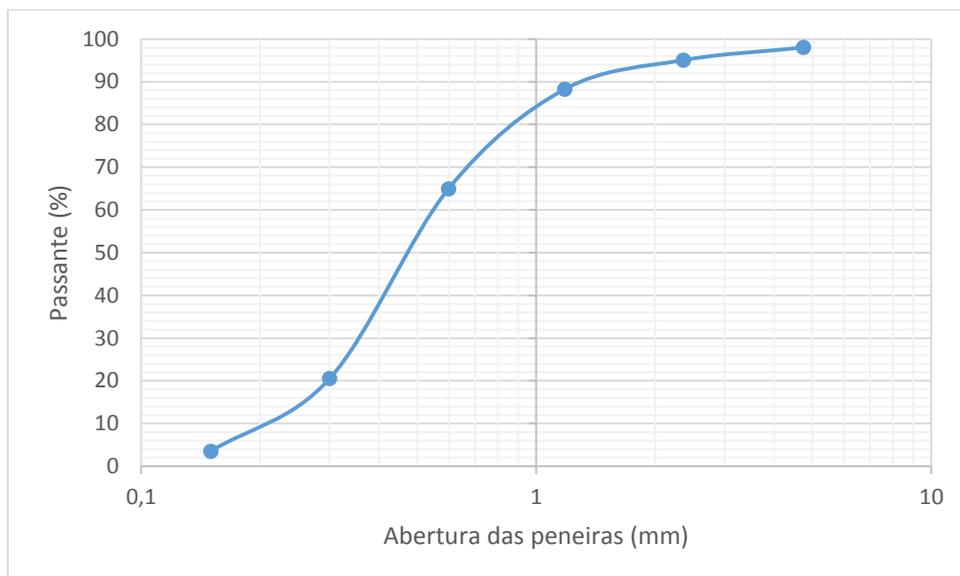
4.1 – Materiais

4.1.1 – Características do concreto

Para a devida caracterização e dosagem de todos os componentes do concreto, foram feitos alguns ensaios essenciais para tal fim. Como entre eles, o peso específico real do cimento, areia e da brita, e a granulometria da areia e da brita que fornece as informações necessárias para o cálculo do consumo de cada material para a formulação dos corpos de prova.

Para o ensaio de granulometria, tem-se os seguintes resultados para a areia média, de acordo com a ABNT NBR NM 248 / 2003 – *Determinação da composição granulométrica*:

Figura 11 - Gráfico granulométrico da areia



(Fonte: Autoria própria)

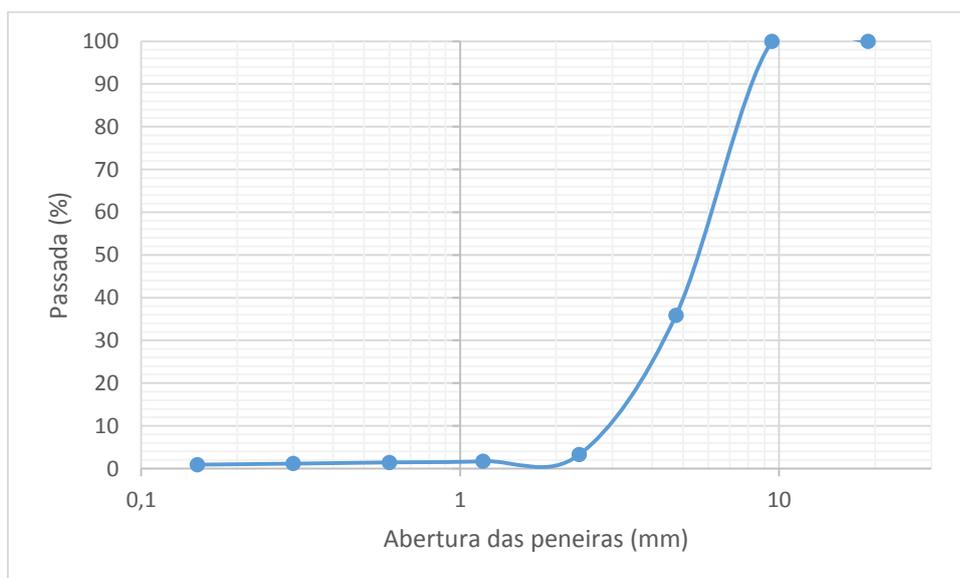
Tabela 1 - Características da areia

Dmáx. Caract. (mm)	2,4
Módulo de Finura	2,29
Classificação	Areia Média

(Fonte: Autoria própria)

Para o ensaio de granulometria, temos os seguintes resultados para o agregado graúdo, que foi adotado para a dosagem, de acordo com a ABNT NBR NM 248:

Figura 12 - Gráfico granulométrico da brita



(Fonte: Autoria própria)

Tabela 2 - Características da brita

Dmáx. Caract. (mm)	9,5
Módulo de Finura	5,556
Classificação	Brita 0

(Fonte: Autoria própria)

As massas específicas reais foram determinadas, como sendo para o cimento 3,01 kg/dm³ de acordo com a NBR NM 23/2001 – *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*, para a areia 2,57 kg/dm³ de acordo com a NBR NM 26/2001 – *Agregados – Amostragem*, e para a brita 2,61 kg/dm³ de acordo com a NBR NM 53/2003 – *Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*.

Também foram determinadas as massas unitárias dos agregados, sendo a da areia média 1,475 kg/dm³ e da brita 1,373 kg/dm³, ambos de acordo com a NBR NM 45, sendo seguidas todas as determinações da norma citada.

Foi utilizado um traço do concreto 1: 1,71: 2,67: 0,5 (cimento, areia, brita e água, respectivamente) em massa, onde a resistência estimada foi de 30 Mpa, no qual previamente foi definida a quantidade de cimento, sendo ela de 400 kg/m³, e o fator a/c, que foi 0,45 e calculado o restante dos agregados para chegar nos resultados esperados.

Ainda foi utilizado o plastificante MC Power Flow 3100, numa quantidade de 1,8% da massa de cimento utilizada.

Foi feito o Slump Test em todos os CP's para checar o abatimento do concreto chegando num resultado esperado que foi de 10 ±2 cm.

4.1.2 – Nitinol utilizado

Foram utilizados 33,4 m de Nitinol para a composição dos corpos de prova. Sendo utilizados 0,5% de volume de fibra em cada corpo de prova, totalizando em torno de 4 metros de fibra para cada CP. Como foram confeccionados 6 CPs com a liga, totalizariam 40 m de liga no total, mas foi dada uma folga devido à grande perda de material, principalmente, pela utilização de uma betoneira com capacidade bem superior aos volumes de concreto para moldagem de cada tipo de CP, sendo utilizada uma betoneira de 120 l de capacidade.

Tabela 3 - Tabela resumo de Nitinol

Resumo da fibra utilizada - NITINOL	
Quantidade total utilizada (m)	33,4 m
Quantidade por CP (%)	0,50%
Quantidade por CP (m)	4 m
Quantidade de CPs	6

Para a caracterização do Nitinol foram feitos alguns ensaios para ser definido alguma das suas propriedades, como curva tensão deformação, análise da temperatura de transformação de fase, composição química, entre outros.

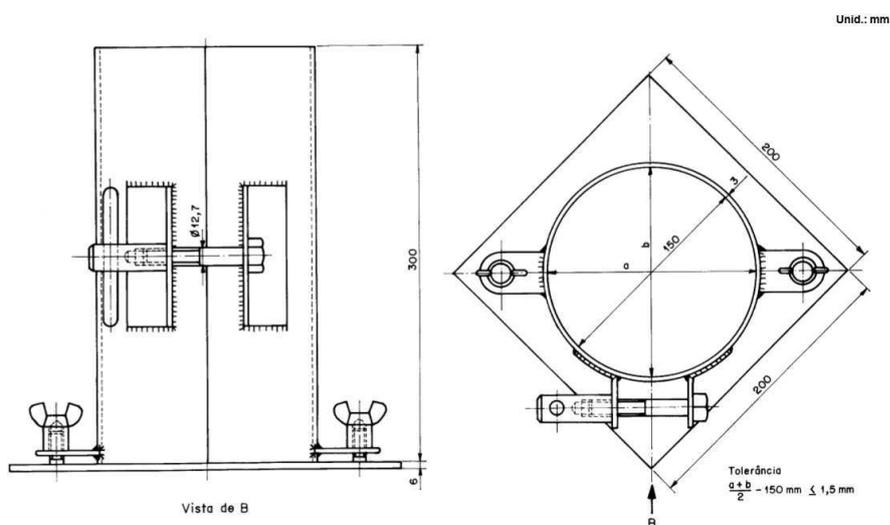
Foi usada uma liga de Ni-Ti com diâmetro de 1,5 mm, com massa específica de 6.280 kg/m³, onde sua massa foi medida com uma balança de 4 dígitos de precisão com um volume de material pré-definido.

4.2 - Métodos

Foram usados corpos de prova cilíndricos de concreto com reforço de ligas de memória de forma, utilizadas como fibras curtas para o reforço do concreto e assim poder comparar seus valores entre os CPs com as fibras ativadas (estado austenítico) através de aquecimento, os CPs com fibras não ativadas (estado martencítico) e os CPs sem adição de fibras.

Os corpos de prova seguiram a norma – ABNT NBR 5738/2003 - *Procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova*. Foram utilizados moldes de corpos-de-prova com o modelo na Figura 13, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20cm de altura.

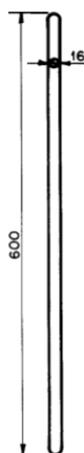
Figura 13 - Molde cilíndrico de dimensão básica de 150mm



(Fonte: NBR – 5738)

Foi utilizada uma haste de adensamento nas dimensões mostradas na figura abaixo, como padronizada pela norma.

Figura 14 - Haste de socamento (Unidade em mm)



(Fonte: NBR – 5738)

Na composição dos corpos de prova foram usadas as fibras curtas de Nitinol nas dimensões de 1,5 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento.

Essas fibras foram previamente aquecidas a uma temperatura acima do valor para sua ativação, com objetivo de alívio de tensões no fio devido a sua usinagem no processo de fabricação. Foram cortadas em pedaços de 30 cm, para haver melhor controle da quantidade do material que estava sendo trabalhada. Em seguida elas foram lixadas com uma lixa 60, para gerar reentrâncias superficiais e melhorar a aderência entre o Nitinol e o concreto. Depois de

lixadas, foram feitas marcações com o auxílio de um alicate, apertando o alicate várias vezes sobre o fio, também visando maior aderência do conjunto fibra-concreto. A Figura 15 mostra como ficou a superfície do fio.

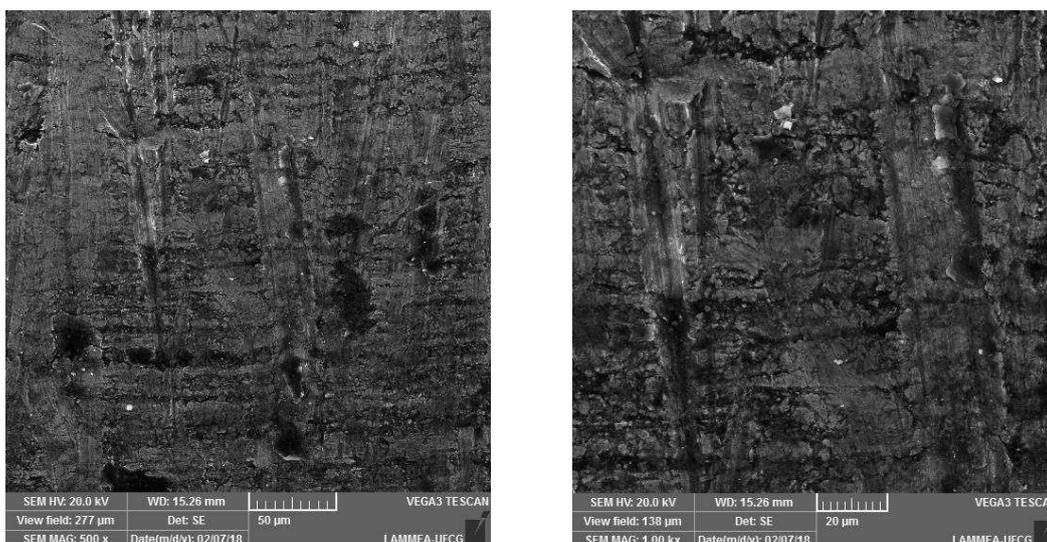
Figura 15 - Fios de Nitinol



(Fonte: Autoria própria)

Objetivando uma melhor análise das ranhuras feitas através desses procedimentos, foi feito uma análise de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), procedimento realizado no Lammea – UFCG, onde as ranhuras eram em torno de $10\ \mu\text{m}$. Os resultados com a ampliação de 500 vezes e 1000 vezes são mostrados na Figura 16.

Figura 16 - Ensaio MEV - 500 e 1000x



(Fonte: Lammea - UFCG)

As ligas que foram ativadas posteriormente nos corpos de prova, foram alongadas cerca de 10%, com carga aproximada de 1kN, na máquina BME – 10kN desenvolvido por Oswaldo Filizola, no Lammea - UFCG, em seguida imersos em água com temperatura em torno de 5°C para que não houvesse a possibilidade da ativação precoce da liga e, por fim, foram cortadas em pedaços de 1 cm a fim de que com a ativação da liga, esse tamanho seja reduzido a seu tamanho original e seja imposta a mesma força de alongamento para o corpo de prova, com objetivo de confinar o concreto. A Figura a seguir mostra o sistema que foi usado para o alongamento dos fios, composto pela máquina (BME – 10kN), um medidor da carga aplicada no sistema e um computador para a aquisição dos dados.

Figura 17 - Sistema para o alongamento dos fios



(Fonte: Autoria própria)

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram imediatamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto e protegê-lo da ação das intempéries.

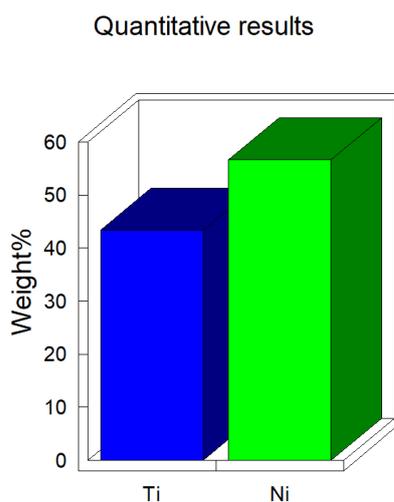
Foram utilizados 9 corpos de prova, sendo, três de concreto sem fibras e seis de concreto com fibras de Nitinol.

Foi medida a resistência à compressão do concreto nas 9 amostras através da norma de ensaio de compressão simples do concreto em corpos de prova cilíndricos (NBR – 5739) à 14 dias de cura submersa. Foram 3 dos corpos de prova com fibras de Nitinol pré-aquecidas numa estufa até atingir uma temperatura de 130°C, por 3 horas, para garantir que o CP se encontre numa temperatura acima de 80°C, que é a temperatura média onde a liga se encontra “ativada”.

5.0 – RESULTADOS

Sua composição foi definida através de um ensaio de EDS (*Energy dispersive spectroscopy*), no Lammea – UFCG, que faz uma análise semi-quantitativo e superficial, onde a sua composição atômica é de 48,45% de Ti e 51,55% de Ni e o peso de cada elemento foi de 43,41% de Ti e 56,59% de Ni, como mostrado na Figura a seguir.

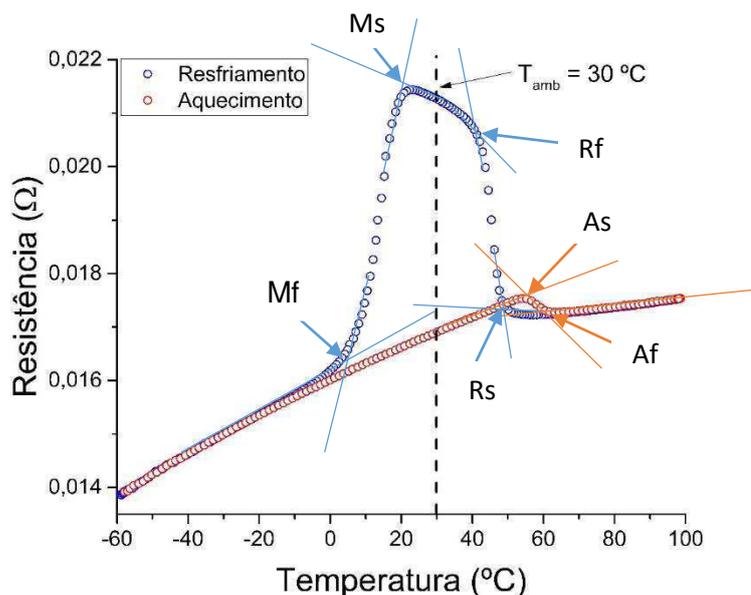
Figura 18 - Gráfico do ensaio EDS do NITINOL



(Fonte: Lammea - UFCG)

Foi definida sua temperatura de ativação através de uma análise por resistividade elétrica (RET), na qual a amostra foi submetida à uma varredura de temperatura de -60 à 100°C à uma corrente constante de 600 mA onde, a partir da mudança de resistividade, pelo método das tangentes, foram identificadas as temperaturas críticas de início e fim de transformação de fase, como é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico da resistividade da liga por RET



(Fonte: Lammea - UFCG)

Através da análise da liga por RET, identificaram-se as temperaturas críticas de transformação de fase. É possível verificar a temperatura final e inicial de transformação da fase martensítica (Mf e Ms, respectivamente), o ponto de temperatura final e inicial da transformação da Fase-R (Rf e Rs, respectivamente), que compreende uma fase martensítica cristalina (também chamada, Martensita Romboédica) e, por fim, as temperaturas inicial e final da transformação de fase austenítica (As e Af, respectivamente). Abaixo têm-se os resultados das temperaturas citadas.

Tabela 4 - Temperaturas de transformação do Nitinol

Rs (°C)	Rf (°C)	Ms(°C)	Mf (°C)	As (°C)	Af (°C)
49	42,1	19,5	7,8	-	61,9

(Fonte: Lammea – Ufcg)

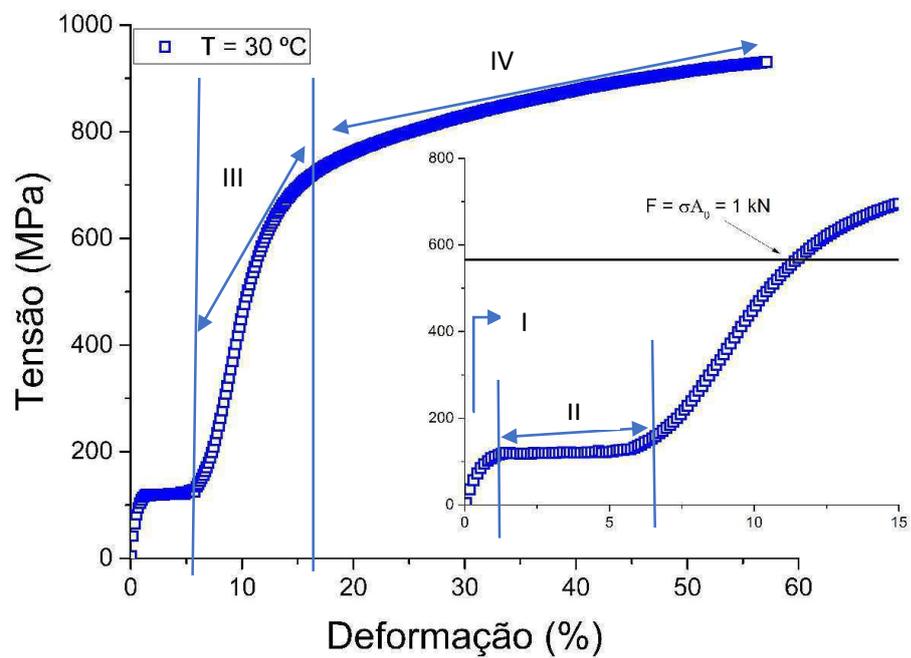
Também foi definida a curva de tensão-deformação através do equipamento modelo INSTRON – 5582 em temperatura ambiente. A Figura 20 abaixo mostra o equipamento usado e o gráfico (figura 21) obtido pelo ensaio.

Figura 20 - INSTRON - 5582



(Fonte: Autoria própria)

Figura 21 - Gráfico Tensão-deformação à 30°C



(Fonte: Autoria própria)

Neste nível de temperatura (estado martensítico) podem ser descritas quatro partes do gráfico apresentado na Figura 21. A primeira, onde a curva segue uma linha na diagonal, é definida como a região elástica da liga, no estado martensítico maclado (I). A segunda, onde

com a mesma carga a deformação cresce em média 5% (reta na horizontal), é chamado de platô de reorganização da martensita, onde ela passa do estado maclada para o não-maclado (Orientada)(II). A terceira, que compreende a parte logo após o platô na parte inclinada (III), é a fase onde a liga se encontra como martensita não-maclada (orientada), pois acontece uma orientação das partículas, mas não ocorre uma mudança de fase. A quarta, compreende a última parte, chamada de zona de plastificação (IV), onde mesmo submetendo o fio à uma temperatura acima de A_f ela ainda continua com uma deformação residual significativa.

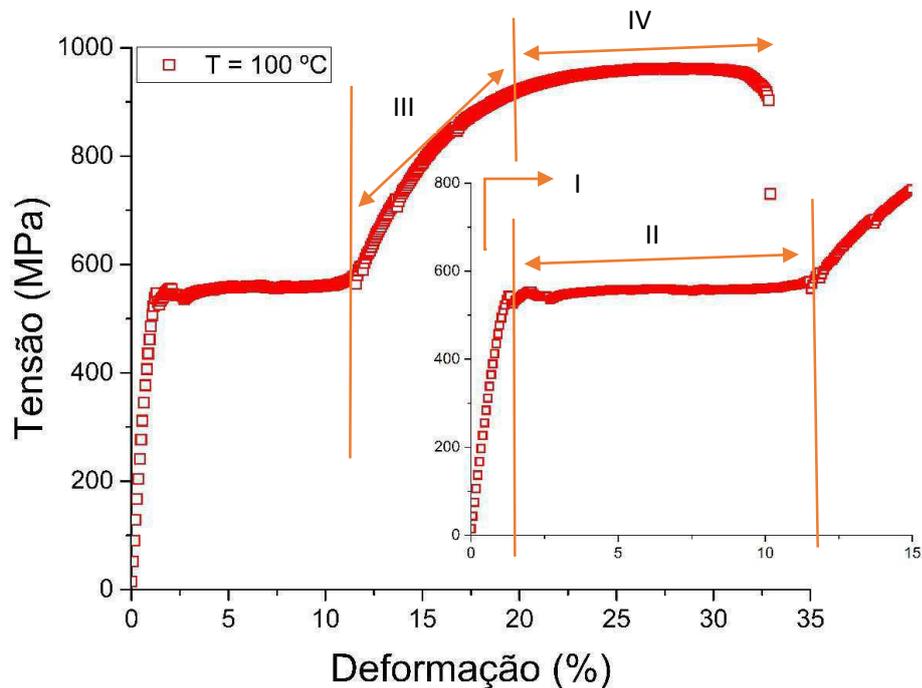
Foi feita a mesma análise com a máquina acoplada com uma estufa para aquecer a liga à 100°C e verificar seu comportamento, como mostrado na figura 22.

Figura 22 - INSTRON - 5582 com o forno acoplado



(Fonte: Autoria própria)

Figura 23 - Gráfico Tensão-deformação à 100°C



(Fonte: Autoria própria)

Como é possível observar no gráfico acima, da liga no estado austenítico, ele é dividido em 4 partes. A primeira, sendo ela a parte inclinada na diagonal (I), compreende a fase elástica do material, onde ela se encontra na região elástica, no estado austenítico. A segunda, também chamada de platô de transformação da fase austenítica para a martensítica não-maclada (organizada) (II), onde com a mesma carga aplicada, se atinge uma grande deformação. A terceira, compreende uma nova região elástica (III), com o mesmo módulo de elasticidade (inclinação da reta) da primeira região elástica, mas agora no estado martensítico não maclado. Até esta região é possível se recuperar o tamanho original com uma deformação residual mínima, só pelo descarregamento no fio. A quarta compreende à região de plastificação (IV) onde, se houvesse um descarregamento, seria perceptível uma deformação residual, mesmo com uma recuperação de tamanho significativa.

A seguir são apresentados os resultados da resistência dos corpos de prova submetidos à compressão uniaxial.

Para os corpos de prova sem a liga os resultados obtidos foram:

Quadro 5 - Resultados - Concreto sem fibra

Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	40,7
CP 2	40,1
CP 3	42,0
Média	40,9

Nas figuras 24 e 25 é possível ver duas fotos dos CPs sem fibras depois do seu rompimento:

Figura 24 - CP rompido sem fibras



(Fonte: Autoria própria)

Figura 25 - CP rompido sem fibras



(Fonte: Autoria própria)

Para os corpos de prova com a liga no estado martensítico (não ativado) os resultados obtidos foram:

Quadro 6 - Resultados - Concreto com fibra não ativada

Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	27,6
CP 2	22,9
CP 3	23,4
Média	24,6

Como é possível ver os corpos de prova rompidos, nas figuras 26 e 27.

Figura 26 - CP rompido com fibra não-ativada



(Fonte: Autoria própria)

Figura 27 - CP rompido com fibra não-ativada



(Fonte: Autoria própria)

Nestes CPs foi verificado que o rompimento do corpo de prova não aconteceu de forma brusca como foi possível ver nos corpos de prova sem a fibra, fazendo uma deformação cônica como mostrada na NBR – 5739/1994 e com diminuição considerável da sua altura.

Quadro 7 - Resultados - Concreto com fibra ativada

Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	31,2
CP 2	24,2
CP 3	27,1
Média	27,5

Nas figuras 28 e 29 é possível ver duas fotos de dois CPs com a fibra no estado austenítico, ou superelástico.

Figura 28 - CP rompido com fibra ativada



(Fonte: Autoria própria)

Figura 29 - CP rompido com fibra ativada



(Fonte: Autoria própria)

Foram verificadas as temperaturas superficiais no começo do ensaio de todos os corpos de prova com a fibra ativada através de um termômetro a laser, sendo elas 99,2°C, 97,8°C e 104,2°C. Também foram verificadas as temperaturas internas logo após o rompimento, sendo elas 80,4°C, 82,3°C e 84,0°C. Onde foi confirmado que todos os corpos estavam acima da temperatura final de transformação para a fase austenítica (A_f), como é possível ver na Figura 26.

Figura 30 - Termômetro a laser usado para medir a temperatura do concreto ao fazer o ensaio



(Fonte: Autoria própria)

Também foi verificada a temperatura no final de todos os ensaios e constatado que o concreto se encontrava externa e internamente com temperaturas acima de A_f . Na tabela abaixo é mostrado o resumo das temperaturas internas e externas dos corpos de prova.

Tabela 8 - Resumo das temperaturas internas e externas dos corpos de prova

Corpo de Prova	Temperatura superficial (°C)	Temperatura interna (°C)
1	99,2	80,4
2	97,8	82,3
3	104,2	84,0

(Fonte: Autoria própria)

6.0 – CONCLUSÃO

Como visto, obteve-se a curva tensão x deformação dos fios no estado Martensítico e Austenítico, o que foi de grande importância para a determinação de vários pontos de tensão da liga.

Também foi determinada a composição química e as temperaturas de transformação dos diferentes estados da liga, sendo fundamental para uma caracterização mais precisa do material e de suas propriedades, como mostrado na pesquisa.

Verificou-se que os CPs sem os fios atingiram uma resistência bem acima do esperado, pois foi feito o traço para que o concreto atingisse um f_{ck} de 30 MPa. Esses resultados provavelmente foram devido aos ajustes feitos na quantidade de super-plastificante durante a sua mistura. Também foram feitos três “*slump tests*” nesta massa para chegar no resultado esperado de 8 cm, fazendo com que a perda de água fosse considerável no processo de mistura e moldagem, diminuindo assim o fator água cimento e aumentando a resistência.

Nos corpos de prova com os fios não-ativados verificou-se, aparentemente, que eles não tiveram contribuição considerável na resistência do corpo de prova, se assim comparados com os CPs sem fibra, principalmente devido a flexibilidade da liga em seu estado martensítico e de sua baixa aderência no concreto, que fez com que houvesse pontos de baixa resistência dentro do compósito (aonde os fios estavam).

Já nos corpos de prova com os fios ativados, foi possível ver que eles se mostraram mais resistentes que os com as fibras não ativadas, mostrando que a ativação dos fios tiveram diferença significativa na resistência do concreto, quando ativados. Mas não teve resistência superior aos CPs sem as fibras, provavelmente devido ao curto tamanho dos fios (fibras) que foram adicionados ao concreto e sua aderência que não foi suficiente para conter com tanta eficiência o esforço de compressão no concreto.

É preciso uma reavaliação do tamanho das fibras adicionadas e a padronização na execução de todos os tipos de corpos de prova. Para se obter resultados mais significativos e representativos para a pesquisa.

7.0 – BIBLIOGRAFIA

BASTOS, P. S. DOS S., PINHEIRO, L. M. Influência da Brita 2 em Concretos com fibras-de-aço, 42º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza, IBRACON, 2000.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fiber reinforced cementitious composites. 2.ed. Tayloe & Francis, 2007;

CÁNOVAZ, Manuel Fernández. Patologia e terapia do concreto armado. São Paulo: Pini, 1988.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE BÉTON. FIP-Model Code 2010: forst complete draft. Lausanne: fib, bulletin 55, v.1, March 2010;

FIGUEIREDO, A. D., HELENE, P. R. L. – Estudo da Dosagem do Concreto Projetado Via Úmida Reforçado com fibras de Aço. International Congress on High Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures, Junho 1996;

FURLAND Jr., S. Vigas de Concreto com taxas reduzidas de Armadura de Cisalhamento: Influência do emprego de Fibras Curtas e de Protensão. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 1995.

HANNANT, D. J. Cement-based Composites. In: Comprehensive Composite Materials. University of Surrey, Guildford, UK, p. 323-362, 2000;

Lagoudas, D. C. 2008. Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Application. Edited by Lagoudas, D. C., Springer, Texas, USA.

LECCE, Leonardo and CONCILIO, Antonio – Shape Memory Alloy Engineering – For Aerospace, Structural and Biomedical Applications, Waltham, USA, 2015.

LI, Bing-Yun, Rong, Li-Jian, LI, Yi-Yi, GJUNTER, V.E.; An investigation of the synthesis of Ti-50 at pct Ni alloys through combustion synthesis and conventional powder sintering. Metallurgical and Materials Transactions. July 2000. 31 A, 1867-71.

MEHTA, P. K. – Concrete Structure Properties and Materials. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1986.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo. PINI, 2008.

MO, Y. L., KAIRY, OTERO, K., Song, G.– Desenvolvimento and Testing of a Proof of- Concept Smart Concrete Structure. Department of Civil Engineering and Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Texas, 2004.

MOTA, A. R., – Introdução ao Estudo da Transformação Martensítica em ligas de Cobre com Memória de Forma. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMPDEMA, Outubro 2002.

NASCIMENTO, F. C., – Efeito do Tamanho de Grão nas Propriedades Mecânicas e na Recuperação de Forma de Ligas Inoxidáveis com Efeito de Memória de Forma, Tese de Doutorado, DEMA/FEM/UNICAMP, Campinas, SP, 2002.

NEVILLE, A. M. – Propriedades do Concreto. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1986.

NOGUEIRA, C. M., - Estudo das Propriedades Mecânicas de Concretos Reforçados com Fibras Curtas com Efeito Memória de Forma, DEE/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2015.

OLIVEIRA, H. M. R., - Estudo experimental do comportamento térmico e dinâmico de fios de liga com memória de forma NiTi em regime superelástico, Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014.

PINHEIRO, M. L. Estruturas de concreto. Departamento de Engenharia de Estrutura – USP – EESC, 2010.

REIS, W. P. Caracterização de ligas de níquel-titânio para ortodontia. Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2001.

SAADAT, S.; SALICHS, J.; NOORI, M.; HOU, Z.; DAVOODI, H.; BAR-ON, I., SUZUKI, Y.; MASUDA, A., – An Overview of Vibration and Seismic Applications of NiTi Shape Memory Alloy, Smart Mater. Struct. 11, 2002, 218-229.

SHAH, S.P.; SWARTZ, S.E.; OUYANG, C. – Fracture Mechanics of Concrete - Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-brittle Materials. New York, John Wiley & Sons, 1995.