

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA PARA CONCRETO
CONVENCIONAIS POR MEIO DO DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA
SMARTPHONE PELO MÉTODO DA MATURIDADE**

GIOVANI GUILHERME NICOLETTO

BENTO GONÇALVES

2023

**AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA PARA CONCRETO
CONVENCIONAIS POR MEIO DO DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA
SMARTPHONE PELO MÉTODO DA MATURIDADE**

GIOVANI GUILHERME NICOLETTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Vinício Cecconello.

BENTO GONÇALVES

2023

**AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA PARA CONCRETO
CONVENCIONAIS POR MEIO DO DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA
SMARTPHONE PELO MÉTODO DA MATURIDADE**

GIOVANI GUILHERME NICOLETTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Vinício Cecconello.

Aprovado em: / /

Banca Examinadora

Prof. Me. Vinício Cecconello
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Maurício Schäfer
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Gustavo Ribeiro da Silva
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

NICOLETTO, Giovani Guilherme. **Avaliação da estimativa de resistência para concreto convencionais por meio do desenvolvimento de aplicativo para smartphone pelo método da maturidade.** 2023. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul. Bento Gonçalves, 2023.

O concreto é o material estrutural mais utilizado na construção civil, considerado como uma das descobertas mais interessantes para a humanidade e para a sua qualidade de vida. O concreto tem como característica mais importante a resistência à compressão, está demonstra a capacidade do material suportar cargas de compressão sem que haja falha ou deformações excessivas, a determinação da resistência à compressão é necessária desde o concebimento dos projetos estruturais até as fases de execução, onde se faz necessário a retirada de formas e cimbramento e a aplicação de cargas construtivas. Atualmente no Brasil para se determinar a resistência à compressão do concreto se faz uso de um ensaio destrutivo que utiliza corpos de prova curados em condições diferentes da estrutura real, não representado a resistência à compressão real da estrutura. Diversos métodos não destrutivos têm surgido para auxiliar na obtenção da resistência à compressão do concreto, e o método da maturidade é um deles. O método da maturidade busca estimar a resistência à compressão do concreto *in loco* com uso do histórico de temperatura que o concreto foi submetido durante a cura, para realizar esta estimativa é necessário ter conhecimento do desenvolvimento da resistência à compressão em relação a maturidade da mistura em laboratório. O presente trabalho buscou desenvolver um aplicativo para smartphones com o sistema Android que possibilite calcular a maturidade e estimar a resistência à compressão do concreto conforme prescrito pela ASTM C1074 de 2011.

Palavras-chave: Concreto, resistência à compressão, maturidade, aplicativo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Procedimento para desenvolver a relação entre resistência e maturidade.	23
Figura 2 - Esquema do histórico de temperatura e do fator temperatura-tempo.	24
Figura 3 - Fluxograma do programa experimental	29
Figura 4 - Curva Granulométrica do agregado miúdo natural.	33
Figura 5 - Curva Granulométrica do agregado miúdo de britagem.	34
Figura 6 - Curva Granulométrica da composição do agregado miúdo.	35
Figura 7 - Conjunto e sua respectiva forma de cura.....	39
Figura 8 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 1 dia.	40
Figura 9 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 3 dias.	41
Figura 10 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 7 dias.	41
Figura 11 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 14 dias.	42
Figura 12 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 28 dias.	42
Figura 13 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 42 dias.	43
Figura 14 - Lógica da primeira tela do aplicativo.	46
Figura 15 - Lógica da segunda tela.	47
Figura 16 - Resistência à compressão (MPa) x Intervalo de tempo (Dias).	48
Figura 17 - Temperatura média para cada idade de rompimento.	50

Figura 18 - Maturidade (°C-Horas) x Tempo (Dias).....	50
Figura 19 - Maturidade (°C-Horas) x Resistência à compressão.	51
Figura 20 - Log (Maturidade) x Resistência à compressão	52
Figura 21 - Comparação entre os valores reais da resistência (concreto com cura submersa+estufa) vs. valores estimados pela equação obtida (concreto com cura somente submersa) com uso dos valores de maturidade (concreto com cura submersa+estufa).....	53
Figura 22 - Comparação entre os valores reais da resistência (concreto com cura somente submersa) vs. valores estimados pela equação obtida (concreto com cura submersa+estufa) com uso dos valores de maturidade (concreto com cura somente submersa).	54
Figura 23 - Menu principal do aplicativo.....	55
Figura 24 - Tela para cálculo da maturidade e estimar a resistência à compressão.	56
Figura 25 - Cálculo da maturidade e obtenção da equação no aplicativo.	57
Figura 26 - Estimativa da resistência à compressão no aplicativo.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto.....	17
Tabela 2 – Traço do concreto para o estudo.....	31
Tabela 3 – Quantidade dos materiais utilizados.....	31
Tabela 4 – Propriedades físicas e químicas disponibilizadas para Votorantim	32
Tabela 5 - Propriedades do agregado miúdo natural.	33
Tabela 6 - Propriedades do agregado miúdo de britagem.	34
Tabela 7 - Propriedades do agregado miúdo.	35
Tabela 8 - Propriedades do agregado graúdo.....	36
Tabela 9 - Propriedades do agregado graúdo.....	37
Tabela 10 - Intervalo de tempo de cura em 40°C em estufa.	39

LISTA DE SIGLAS

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM – American Society for Testing and Materials

CP-IV – Cimento Portland IV

CP – Corpo-de-prova.

NBR – Norma Brasileira.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVO GERAL	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	14
2.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	15
2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA	16
2.3.1. Relação água/cimento.....	17
2.3.2. Concretagem em baixas temperaturas.....	18
2.3.3. Concretagem em altas temperaturas	18
2.3.4. Processo de Cura.....	19
2.4. METODOS NÃO DESTRUTIVOS	20
2.4.1. Método da maturidade (conceito da maturidade)	21
2.4.1.1. Descrição e etapas do método.....	21
2.4.1.2. Funções de maturidade.....	23
2.4.1.3 Energia aparente de ativação.....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1. ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	28
3.1.1. Fluxograma do programa experimental.....	28
3.2. DETERMINAÇÃO DOS FATORES FIXOS E VARIÁVEIS	29
3.2.1. Fatores fixos.....	29
3.2.2. Fatores variáveis	30
3.3. ETAPA 1.....	30

3.3.1. Traço de estudo do concreto	31
3.3.2. Caracterização dos materiais utilizados	32
3.3.2.1. Cimento Portland.....	32
3.3.2.2. Agregados miúdos.....	32
3.3.2.3. Agregados graúdos	36
3.3.2.4. Água	37
3.3.2.5 Aditivo.....	37
3.3.3. Produção do concreto e moldagem.....	38
3.4. ETAPA 2.....	38
3.4.1. Cura dos corpos de prova	39
3.4.2. Monitoramento da temperatura de cura	40
3.5. ETAPA 3.....	43
3.5.1. Ensaio de resistência à compressão	43
3.6. ETAPA 4.....	44
3.6.1. Cálculo da maturidade.....	44
3.6.2. Gerar a curva maturidade x resistência.....	44
3.6.3. Obter a equação da curva para estimar a resistência	45
3.6.4. Estimativa da resistência.....	45
3.7. ETAPA 5.....	45
3.7.1. Desenvolvimento do aplicativo	45
3.7.2. Lógica do aplicativo	46
4. RESULTADOS OBTIDOS	48
4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	48
4.2. INDICE DE MATURIDADE.....	49

4.3. CURVA DE MATURIDADE X RESISTÊNCIA	51
4.4. EQUAÇÃO PARA ESTIMAR A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	52
4.5. ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA PELA EQUAÇÃO OBTIDA.....	53
4.6. APLICATIVO DESENVOLVIDO	55
5. CONCLUSÕES	59
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICES	66
APÊNDICE A – VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DESVIO PADRÃO.....	66
APÊNDICE B – VALORES UTILIZADOS PARA CALCULAR A MATURIDADE. ...	68
APÊNDICE C – VALORES DE MATURIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UTILIZADOS PARA GERAR O GRÁFICO.....	69
APÊNDICE D – VALORES DOS RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES.....	70

1. INTRODUÇÃO

Helene e Andrade (2007) consideram o concreto de cimento Portland como o material estrutural da construção civil mais importante dos últimos anos. Enfatizam que este pode ser uma das descobertas mais interessantes para a humanidade e para a sua qualidade de vida. Martin (2005) descreveu o concreto como um dos materiais fundamentais para nossa civilização, e se o concreto possuir uma seleção correta dos componentes e um estudo qualificado para as dosagens este pode ser modificado de forma vasta a fim de atingir as diversas necessidades exigidas.

Segundo Malhotra e Mehta (1996), o concreto de cimento Portland pode ser utilizado em plataformas marinhas, grandes barragens, aquedutos e edifícios de grande porte de concreto armado ou protendido. O concreto na maioria dos casos se mostra como uma alternativa viável economicamente, que apresenta durabilidade e resistência satisfatória, e não exige durante sua produção grandes quantidades de energia (ABCP, 2002).

Estudos sempre buscam de forma contínua aperfeiçoamentos a fim de maximizar o desempenho do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido, sempre tendo como objetivo obter o melhor desempenho, diminuir o custo de produção e realizar a desforma e os processos seguintes em tempo menor (GHASEMI, 2017).

No momento de concepção dos diversos projetos estruturais, bem como na definição dos materiais utilizados no processo construtivo, a resistência à compressão do concreto é considerada como o parâmetro mais importante, e o seu conhecimento proporciona e facilita a obtenção de outras características do concreto (PEREIRA, 1999). Durante a execução de estruturas em concreto armado, inúmeras são as situações que o conhecimento da resistência real do concreto é necessário, como na retirada de cimbramento, na desforma ou para aplicação de protensão e cargas construtivas (ASTM C 1074, 2011).

Na atualidade, os métodos não destrutivos para a determinação da resistência à compressão têm uma crescente utilização, isso deve-se pelas vantagens na obtenção das características real da estrutura, dispensado o uso de testemunhos. Os ensaios têm uma praticidade maior o que torna o mais rápido, vale ressaltar que a resistência é determinada *in loco*, ou seja, está é ligada diretamente a estrutura real (AZEVEDO, 2008).

O método da maturidade possibilita o acompanhamento do desenvolvimento da resistência do concreto nas idades iniciais logo após a concretagem, este ajuda na tomada de decisões relacionadas ao início das etapas seguintes (MALHOTRA & CARINO, 2004). A ASTM C1074 (2011) considera que a resistência do concreto pode ser estimada com o uso do índice de maturidade do concreto, este índice é baseado no histórico de temperatura que o concreto foi exposto durante a cura. O presente trabalho buscou desenvolver uma ferramenta que possibilite estimar diretamente pelo smartphone a resistência do concreto, seguindo o método da maturidade prescrito pela ASTM C1074 (2011).

1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um aplicativo para smartphone que calcula a maturidade e estima a resistência de concretos convencionais pelo método da maturidade prescrito pela ASTM C1074 de 2011.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) avaliar a importância da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão;
- b) modelar e desenvolver as funcionalidades para utilização do aplicativo em smartphones;
- c) comparar os valores reais obtidos com os valores estimados no aplicativo conforme prescrito pela ASTM C1074 (2011).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são descritos diferentes aspectos sobre as propriedades do concreto, bem como os principais fatores que podem afetar na resistência do concreto. Além disso são abordados os principais fundamentos do método da maturidade e sua aplicabilidade.

2.1. CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, é um material homogêneo composto pelo cimento, agregados de granulometrias diversas e água, sendo o primeiro destes o aglomerante, que quando entra em contato com a água forma uma pasta que adere em outros fragmentos, esta mistura é altamente resistente a compressão e possibilita uma modelagem (LIMA *et al.*, 2014).

O concreto se diferencia de outros materiais devido a sua resistência à água, que possibilita a aplicação destes em diversas situações em que materiais com o aço e madeira teriam problemas de deterioração ao decorrer do tempo, também é considerado um ótimo material para a construção civil devido a facilidade de encontrar os insumos necessários para a produção por um preço acessível (LIMA *et al.*, 2014). Mehta e Monteiro (1994) também ressaltam que o concreto tem o seu uso difundido devido a facilidade de execução dos elementos estruturais com variedade de formas e tamanhos, e ao baixo custo e facilidade de obtenção dos materiais perante a disponibilidade.

Almeida (2002) cita que para que haja um concreto resistente, durável, com um bom aspecto e viabilidade econômica é necessário realizar um estudo prévio sobre as propriedades de cada um dos materiais constituintes da mistura, bem como os fatores que podem alterá-los. Almeida ressalta que a proporção do traço, a mistura dos materiais, o transporte, o lançamento e adensamento do concreto devem ser realizados de forma correta, e enfatiza que o processo de cura deve ser cuidadoso, nesta etapa busca se evitar que a água presente no concreto evapore de forma prematura impedindo a hidratação do cimento.

O concreto nas idades iniciais, ou seja, nas primeiras horas posteriormente ter sido concretado, adquire resistência através das reações químicas entre os materiais cimentícios e a água presente na mistura. Este processo de hidratação é diretamente afetado pela temperatura do concreto, conforme maior a temperatura maior será a taxa de reação. Portanto, é necessário garantir umidade suficiente para a mistura (ABRASFE).

2.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Branco e Pieretti (2012) consideram a resistência à compressão como a característica mais importante do concreto, devido ao fato do concreto trabalhar de forma majoritária à compressão, mas também devido a este parâmetro possibilitar através de relações empíricas obter outros parâmetros físicos. Para Neville (2013) a resistência à compressão é uma das propriedades mecânicas mais importante do concreto, ela representa a capacidade do material suportar cargas de compressão sem que haja falha ou que sofra deformações excessivas. A resistência à compressão do concreto é utilizada como parâmetro de projeto para as estruturas de concreto armado, é fundamental para garantir a segurança e a durabilidade das construções.

Mehta e Monteiro (2008), consideram que a resistência à compressão do concreto é influenciada por diversos fatores, como a qualidade dos materiais constituintes, as proporções da mistura, a idade do concreto, as condições de cura e o processo de endurecimentos. Esses autores salientam a importância de um estudo prévio adequado das dosagens de concreto e da seleção dos materiais a fim de obter resistência à compressão compatíveis com a desejada, sempre considerando as exigências especificadas em projeto.

No Brasil o processo para obter a resistência à compressão do concreto é obtida através da moldagem dos corpos de prova conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015) e o ensaio à compressão conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Neville e Brooks (2013) apontam que a idade ideal de rompimento dos corpos de prova é aos 28 dias, porém caso necessário é possível realizar testes em outras idades do concreto, como aos 7 dias e aos 63 dias. Na maioria das vezes a resistência à compressão é medida com o uso de corpos de prova cilíndricos com o padrão de

10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com cura úmida em temperatura de 20°C, ensaiados com a idade de 28 dias (ANDOLFATO, 2002).

Para Malhotra e Carino (2004) a determinação de forma precisa da resistência à compressão do concreto é indispensável em diversos estágios da construção, desde a fase de projeto, em que a resistência à compressão é utilizada para dimensionar os diversos elementos estruturais, até as fases de execução da obra, onde ela se torna necessária para a retirada de cimbramento, desforma e aplicação de cargas.

Para a ASTM 1074 no processo de execução de obras é de extrema importância ter o conhecimento das características reais que a estrutura possui em determinado momento, seja para poder realizar a desforma, a retirada de cimbramento, a execução de protensões ou a aplicação de cargas construtivas e de serviço na estrutura.

Mehta (2008) cita que o não conhecimento destas características possibilita ocorrer serias consequências em caso de não haver sido atingido valores mínimos para a resistência, como a danificação durante o processo de desforma ou em atividades seguintes.

2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA

Metha (1994), divide em 3 grupos os fatores que influenciam na resistência do concreto: as características dos materiais e suas devidas proporções, as condições de cura e os parâmetros utilizados no ensaio. Enquanto para Neville (1997) na prática os principais fatores que influenciam a resistência do concreto são: a relação água/cimento, a condição do adensamento, a idade e a temperatura. Também há outros fatores que prejudicam a resistência como a relação agregado/cimento, a qualidade dos diversos agregados (granulometria, textura superficial, forma, resistência e rigidez), a dimensão máxima dos agregados e a zona de transição.

Para o concreto possuir uma resistência satisfatória é necessário ter um traço proporcional e correto, uma mistura cuidadosa, bem como o transporte, lançamento e adensamento realizados de forma correta, a cura deve ser contínua por um tempo considerável, visto que a hidratação do cimento continua posteriormente por um

tempo longo, portanto, evitar a evaporação prematura é indispensável (ALMEIDA, 2002).

2.3.1. Relação água/cimento

Petrucci (1998) demonstra que há uma relação entre a resistência final do concreto e a relação água/cimento deste mesmo, diversos pesquisadores já realizaram estudos similares nesta área, e todos chegam na mesma conclusão. Isto pode ser explicado através da Lei de Abrams criada por Duff Abrams (1908), este realizou ensaios em cerca de 50.000 corpos de prova e percebeu que a resistência do concreto no estado duro é inversa à relação a/c.

Neville e Books (2013) apresentam uma tabela com a relação água/cimento do concreto e a sua respectiva resistência à compressão após 28 dias, isto comprova a Lei de Abrams. A Tabela 1, apresentada abaixo demonstra estes valores.

Tabela 1 - Relação entre relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto.

Resistência à compressão média aos 28 dias (MPa)	Relação água/cimento
41,4	0,41
34,5	0,48
27,6	0,57
20,7	0,68
13,8	0,82

Fonte: Neville e Brooks (2013).

Quando se trata da resistência do concreto, este é o fator mais importante, este afeta a pasta cimentícia perante a sua porosidade e a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

2.3.2. Concretagem em baixas temperaturas

Segundo a NBR 14931 (2004), a massa do concreto não deve ser lançada se estiver em temperaturas inferiores a 5°C, ou se houver prevista queda de temperatura ambiente para o valor abaixo de 0°C para os dois dias seguintes da concretagem.

Mindess e Young (2003), consideram que em temperaturas frias podem retardar o processo de hidratação do cimento, proporcionando um efeito negativo no desenvolvimento da resistência do concreto. Baixas temperaturas podem congelar a água presente na mistura, formando gelo e tendo uma expansão, que pode resultar em danos estruturais. Para Neville (2016), caso haja o congelamento imediatamente após o início da pega e antes do ganho de resistência considerável do concreto, a formação do gelo gerará uma desagregação do cimento e agregados, isso causa uma perda de resistência irreparável.

Conforme Cecconello e Tutikian (2012), as temperaturas baixas podem proporcionar efeitos positivos, por exemplo quanto mais lenta for a hidratação do cimento Portland nos primeiros dias, o concreto desenvolverá de forma melhor a sua estrutura cristalina, isso resulta num desempenho superior ao longo do tempo quando comparado com curas com temperaturas maiores.

2.3.3. Concretagem em altas temperaturas

Neville (2016), cita que surgem problemas quando as concretagens são realizadas em dias com o tempo quente, há um aumento na temperatura do concreto no estado fresco, portanto, há também um aumento na evaporação da água presente na mistura do concreto, que afeta diretamente o abatimento do concreto e cria empecilhos no processo de mistura, lançamento e cura do concreto. Isto também interfere no tempo de pega, que é reduzido drasticamente, e na resistência à compressão do concreto, que se torna menor a longo prazo.

Para as concretagens em temperaturas quentes a NBR 14931 (2004) determina que devem ser tomadas medidas para evitar a perda de consistência e reduzir a temperatura do concreto quando a temperatura for superior à 35°C, ou

quando houver umidade relativa inferior a 50%, e se a velocidade do vento for alta ($\Rightarrow 30\text{m/s}$). Neville (2016) também cita que é necessário tomar medidas para contornar estas situações desfavoráveis.

A NBR 14931 (2004) ainda cita que após o processo de lançamento e adensamento do concreto de forma imediata é necessário buscar maneiras de reduzir a perda de água do concreto. Caso as temperaturas forem superiores a 40°C ou haja ventos com velocidade acima de 60m/s , a norma determina que não seja realizada a concretagem. Para um endurecimento do concreto favorável a temperatura deve estar entre 18° e 25° , as temperaturas superiores a essa aceleram o endurecimento, se houver presença de umidade com o calor se torna favorável.

Em alguns casos em que se busca aumentar a temperatura no entorno da peça de concreto com o objetivo de acelerar o endurecimento e as reações químicas responsáveis por este no concreto, na indústria de estruturas pré-fabricadas isto é comumente aplicado (Costa & Silva *et al.* 2009).

Elevadas temperaturas afetam o desenvolvimento das reações de hidratação e as características e posicionamento dos produtos gerados por essas reações. Com a temperatura alta a velocidade inicial de hidratação é grande, portanto não possibilita tempo para a difusão dos produtos para posições mais distantes das partículas de cimento, e impede uma precipitação uniforme nos espaços intersticiais (Verbeck & Helmuth, 1968).

2.3.4. Processo de Cura

Para Neville e Brooks (2013), o processo de cura do concreto são diversas medidas que buscam evitar que haja a evaporação prematura da água que é necessária para a hidratação do cimento, visto que este é o responsável pelo endurecimento da massa de concreto, a cura tem finalidade de manter o concreto saturado até que os espaços ocupados pela água sejam ocupados pelo cimento hidratado, a cura deve se dar início de forma imediata posteriormente ao endurecimento da superfície de concreto.

Para Motter (2010) a cura, independente do modo empregado deve iniciar imediatamente após o término da pega, e deve ser realizada pelo menos por sete dias após o lançamento do concreto na estrutura.

A NBR 14931 (2004) define que a cura deve ser realizada até que o concreto atinja um endurecimento satisfatório, esta é feita com o objetivo de evitar a perda de água pela superfície exposta do item estrutural, para lajes, placas e cascas que são considerados elementos de superfície deve haver a cura até que estes mesmos atinjam uma resistência à compressão igual ou superior a 15 MPa.

2.4. METODOS NÃO DESTRUTIVOS

Quando o cimento é misturado com água, ocorrem reações químicas que resultam na formação de compostos responsáveis pelo endurecimento do concreto, processo conhecido como hidratação do cimento. Inicialmente, o concreto fresco não possui resistência suficiente para suportar seu próprio peso. No entanto, à medida que a matriz cimentícia se forma, ocorre um aumento gradual na resistência do material. A avaliação desse desenvolvimento de resistência é comumente realizada por meio de ensaios mecânicos, amplamente utilizados para o controle tecnológico do concreto em obras. No entanto, além de ser um método dispendioso, ele não reflete com precisão o real ganho de resistência do concreto, pois os corpos de prova são curados em condições de temperatura e umidade diferentes das encontradas no ambiente da obra (SUBRAMANIAM *et al.*, 2002).

Os ensaios não destrutivos aparecem como uma alternativa econômica, eficiente e precisa para contornar esta situação (RHEINHEIMER, 2007). Estes ensaios estão em uma crescente utilização por conta de suas vantagens na obtenção das características da estrutura real, descartando a necessidade de uso de testemunhos. O método da maturidade é um dos vários ensaios não destrutivos que estima a resistência à compressão do concreto *in loco*, com rapidez e praticidade quando comparado com os métodos destrutivos (AZEVEDO 2008).

2.4.1. Método da maturidade (conceito da maturidade)

O conceito da maturidade surgiu na Inglaterra, na década de 50, naquela época o método tinha como base que amostras de um mesmo concreto, com uma mesma maturidade terão a mesma resistência, independente do histórico da temperatura-tempo que esta teve (PERES, 2006).

A resistência do concreto está diretamente relacionada à sua hidratação, que ocorre com o tempo após a mistura do cimento. Além disso, a velocidade de hidratação aumenta conforme a temperatura também aumenta. Dessa forma, pode-se inferir que a resistência do concreto pode ser expressa como uma função da combinação entre tempo e temperatura. Como a resistência é influenciada tanto pela idade quanto pela temperatura, é possível afirmar que ela é uma função da soma do intervalo de tempo multiplicado pela temperatura, o que é conhecido como maturidade, conforme Neville (1997).

Segundo Pinto e Hover (2000), a temperatura do concreto é a única variável que pode afetar a taxa de ganho de resistência ao longo do tempo. A composição dos materiais, proporção da mistura, condições de umidade entre outros fatores que possam influenciar o ganho de resistência não são consideradas no método da maturidade. Estes autores adicionam que o conhecimento do ganho de resistência com o tempo em pelo menos uma condição isotérmica é necessária para a aplicação deste método. Com o conhecimento deste fator em quaisquer outras condições de temperatura ao longo do tempo a resistência é estimada a partir das funções de maturidade que correlacionam a temperatura do concreto ao longo do tempo.

Hulshizer (2001) considera o método simples e eficaz para determinar a resistência inicial do concreto principalmente em concretagens realizadas em climas frios.

2.4.1.1. Descrição e etapas do método

O concreto ganha resistência em função do tempo e da temperatura, portanto, o método consiste basicamente em monitorar a temperatura do concreto *in loco* com

o auxílio de termopares ou os instrumentos denominados medidores de maturidade (Bungey, 1989).

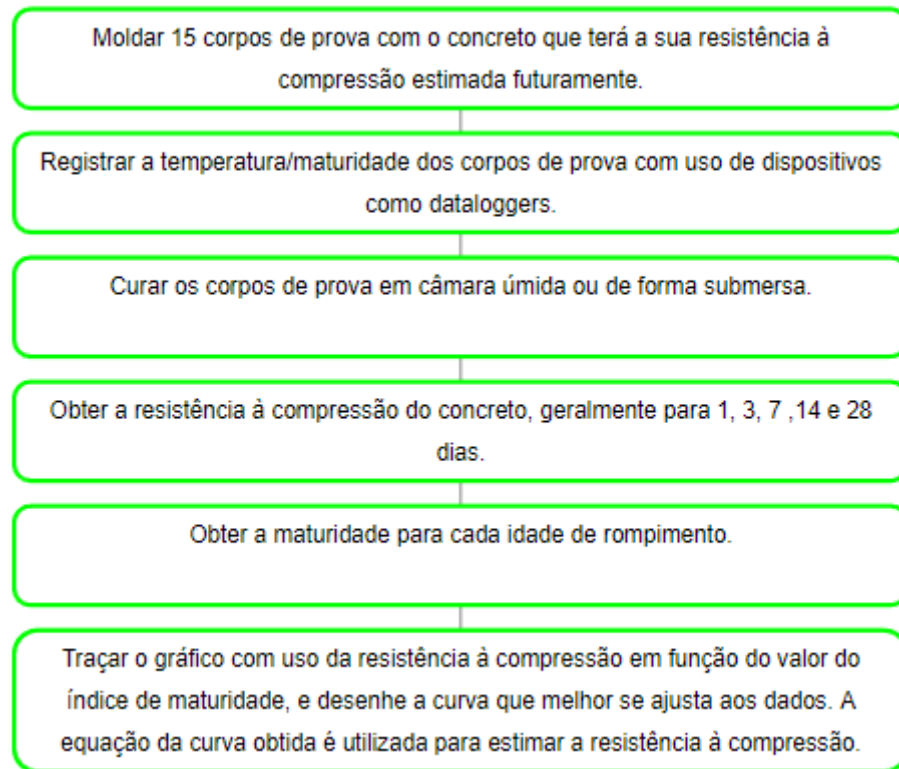
Para Mehta e Monteiro (1994), uma composição específica possui a mesma resistência quando possuem um mesmo nível de maturidade, independente da combinação tempo-temperatura que o item estrutural sofreu. Pinto (2004) também determina que o concreto com um grau de maturidade ou Idade equivalente é relacionado à resistência apresentada pela mistura desconsiderando a combinação tempo-temperatura necessária para tal nível de resistência. Portanto, uma mistura tem capacidade de atingir níveis de resistência iguais em idades reais diferentes, isto deve-se ao histórico de temperatura.

Segundo a ASTM C1074 (2011), para fazer uso do método da maturidade é necessário desenvolver a relação da resistência-maturidade do concreto utilizado previamente em laboratório conforme sua composição, e registrar o histórico de temperatura do concreto a ser medido a resistência. Peres *et al.* (2005) também implica que para a utilização do método da maturidade é necessário conhecer previamente o desenvolvimento da resistência que ocorre ao concreto ao menos em uma temperatura de cura, a partir disso o ganho de resistência pode ser estimado pelas funções de maturidade, relacionando os parâmetros de tempo e temperatura impostos ao concreto avaliado.

Vale ressaltar que o método da maturidade é um ensaio não destrutivo, portanto contribui para a não geração de resíduos e diminui relativamente os custos operacionais do processo de concretagem, principalmente, quando comparado com ensaios mecânicos de resistência à compressão que utilizam corpos de prova moldados *in loco* e rompidos conforme idades pré-estabelecidas conforme a ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018).

A ASTM C1074 (2011) determina as etapas fundamentais para implantar o método, elas estão dispostas na Figura 1.

Figura 1 - Procedimento para desenvolver a relação entre resistência e maturidade.



Fonte: Adaptado ASTM C1074 (2011).

2.4.1.2. Funções de maturidade

A ASTM C1074 (2011) disponibiliza duas alternativas para calcular o índice de maturidade do concreto, ambas são expressões matemáticas que relacionam o histórico de temperatura ao longo do processo de hidratação do cimento.

Saul (1951) foi um dos primeiros pesquisadores com interesse na maturidade e concebeu a ideia de que um concreto com uma certa maturidade, devia possuir uma mesma resistência independente das condições de temperatura e tempo, isto veio a ser chamado de lei de maturidade de Saul. Posteriormente ao pensamento de Saul, outros autores buscaram aprimorar o conceito, Nurse foi um deles, sugerindo que o produto do tempo versus a temperatura resultaria nos efeitos da cura na resistência à compressão (DA SILVA, 2018).

Assim surgiu a equação de Nurse-Saul, considerando o produto do tempo pela temperatura conforme pode-se ver na equação 1:

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

Onde:

M: Maturidade do concreto na idade t, em °C x dias ou °C x horas;

Δt : Intervalo de tempo do processo de endurecimento em horas ou dias;

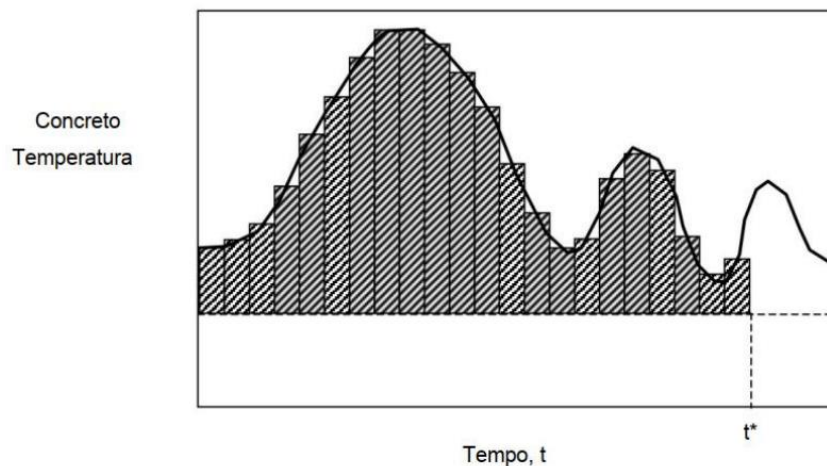
T: Média da temperatura em um intervalo de tempo Δt em °C ou F;

T₀: Temperatura de base a partir da qual não ocorre aumento da resistência;

A temperatura de base é considerada como a temperatura em que não tenha ganho de resistência do concreto, pode-se ser tida como a temperatura abaixo da qual as reações químicas de hidratação ocorrem.

O valor calculado foi denominado de maturidade, a ASTM C1074 considera está equação como o fator temperatura-tempo. A Figura 2 abaixo demonstra um esquema do histórico de temperatura. O fator temperatura-tempo é representado na figura como a área escura abaixo da curva de temperatura do concreto.

Figura 2 - Esquema do histórico de temperatura e do fator temperatura-tempo.



Fonte: CARINO, 2001.

A equação desenvolvida por Nurse-Saul tem como base que a taxa inicial de ganho de força ocorre por uma função linear da temperatura, porém caso haja uma variabilidade ampla da temperatura a aproximação linear proposta poderia ser inválida. Com base nestas informações outros autores surgiram com novas alternativas a serem utilizadas, porém nenhuma alternativa se mostrou tão bem aceita como a equação de Nurse-Saul. Entretanto, no final dos anos 1970 uma nova função surgiu, conhecida com a equação de Arrhenius.

Para Salvador Filho (2001), Arrhenius foi um dos pioneiros a estudar o tema de energia de ativação das equações químicas. Para que haja reação química, necessita a transformação dos reagentes em produtos, as moléculas necessitam de uma quantidade mínima de energia cinética para realizar essa transformação. O processo de hidratação do cimento é considerado uma reação química exotérmica, visto que os reagentes estão em um estado com maior energia que os produtos. Com base nisso pode se definir a energia de ativação como a quantidade de energia necessária para que os reagentes iniciem a reação.

Em 1977, Freiesleben Hansen e Pedersen (FHP) surgiram com uma nova equação para calcular o índice de maturidade com auxílio do registro do histórico de temperatura do concreto. A função tem base na equação de Arrhenius, onde a temperatura tem efeito na velocidade das reações químicas. Com está função pode-se calcular a idade equivalente do concreto (CARINO, 2001). A equação 2 demonstra este processo de cálculo.

$$te = \sum_0^t e \left[\frac{EA}{R} \left(\left(\frac{1}{Ta} \right) - \left(\frac{1}{Tr} \right) \right) \right] \Delta t \quad (2)$$

Onde:

Te: Idade equivalente à temperatura de referência em horas;

EA = energia aparente de ativação, em kJ/mol

R = constante universal de gás (8,314 J/mol °K)

Ta: Média da temperatura no intervalo de tempo em K

Tr = temperatura de referência do concreto

Δt : Intervalo de tempo do processo de endurecimento em horas ou dias;

A equação FHP representa de forma mais precisa o efeito da temperatura na velocidade que a hidratação ocorre, porém para fazer uso desta é preciso ter conhecimento previa da Energia aparente de ativação das reações de hidratação do cimento utilizado (SALVADOR FILHO, 2001). Este método tem uma vantagem, visto que a maturidade está relacionada de forma direta com o grau de hidratação do

cimento, isso torna possível relacionar qualquer propriedade física ou mecânica com o grau de hidratação (SALVADOR FILHO, 2001).

O procedimento presente na ASTM C1074 traz ambas as funções como opção para determinar a maturidade do concreto. Entretanto, vale ressaltar que para a norma, somente é considerado a temperatura do concreto como a variável única que pode afetar o ganho de resistência ao longo do tempo. Outros fatores como a composição dos materiais, proporção da mistura e a condição de umidade não são considerados como possíveis influenciadores do ganho de resistência.

2.4.1.3 Energia aparente de ativação

Peres *et al.* (2003), cita que existem alguns parâmetros importantes para aplicação do método da maturidade, entre eles há a sensibilidade térmica da mistura que demonstra a velocidade que a reação de hidratação do cimento acontece em relação a temperatura, está é denominada de energia aparente de ativação ou energia de ativação, pela sigla "Ea".

Atkins (1998) apud Carvalho (2002) consideram que a energia aparente de ativação ou energia de ativação é proveniente da energia cinética mínima que as moléculas devem possuir, a energia é tida como o necessário para que os reagentes presentes na mistura se tornem no produto, que neste caso é o concreto.

A taxa em que as reações acontecem está diretamente ligada a teoria da colisão, esta teoria implica que a taxa de reação depende de forma direta da frequência em que ocorre colisões entre as partículas presentes na mistura, ou seja, as partículas devem colidir para que haja a reação entre as moléculas. Esta teoria demonstra bem os quatro fatores que interferem na velocidade das reações (PLANE e SIENKO, 1977), conforme cita PERES *et al.* (2003):

a) A natureza dos reagentes químicos é o fator principal na velocidade em que ocorre a reação química, sendo assim a energia de ativação é diferente para cada reação;

b) A concentração dos reagentes afeta na velocidade da reação, visto que o número de colisões tende a aumentar quando a concentração é maior;

c) As moléculas se movem de forma mais rápida em temperaturas maiores, onde haverá mais colisões e a velocidade da reação será maior;

d) A presença de catalisadores tem como objetivo tornar as colisões mais efetivas, que proporciona uma maior velocidade da reação.

Para Pinto (2002) o tipo de cimento utilizado, a quantidade de água utilizada na mistura, o uso ou não de aditivos químicos e minerais podem influenciar na velocidade de hidratação, desta qual a energia de ativação é dependente. A ASTM C 1074 (2011) cita que a energia de ativação pode ser determinada com o uso de uma argamassa que possua o traço do concreto utilizado sem uso dos agregados graúdos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O propósito deste capítulo é apresentar os métodos aplicados no desenvolvimento deste trabalho, e tem como objetivo principal cumprir as premissas apresentadas anteriormente. Nesta secção foram apresentados os materiais e a metodologia utilizadas para obter êxito no estudo.

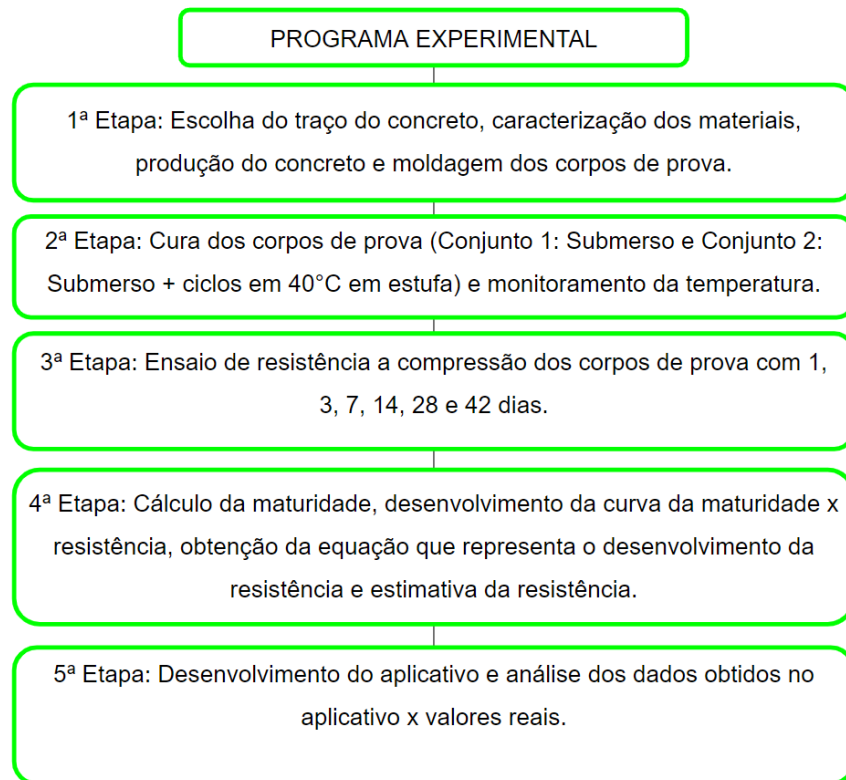
3.1. ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental utilizado neste trabalho está dividido em 5 etapas principais, a primeira etapa tem como objetivo determinar o traço de estudo do concreto que será utilizado, bem como definir e caracterizar os materiais presentes no traço e produzir o concreto, a segunda etapa abrange o monitoramento da temperatura do concreto durante o processo de cura, na terceira etapa ocorre a determinação da resistência à compressão dos corpos de prova pelo rompimento deles. Na quarta etapa é calculado o índice de maturidade para as idades de rompimento e correlacionado com a resistência à compressão obtida, a partir dos valores utilizados é obtida a equação que representa o desenvolvimento da resistência em função da maturidade e pode ser feito a estimativa da resistência do concreto com uso do valor da maturidade. A quinta etapa consiste no desenvolvimento do aplicativo e seu funcionamento.

3.1.1. Fluxograma do programa experimental

A Figura 3, apresenta o fluxograma das principais etapas para desenvolvimento do programa experimental, as etapas serão detalhadas nos itens abaixo.

Figura 3 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autor

3.2. DETERMINAÇÃO DOS FATORES FIXOS E VARIÁVEIS

Para desenvolvimento do trabalho foi necessário a produção de dois conjuntos de 18 corpos de prova cada, e algumas condições foram definidas como variáveis e outras como fixas, abaixo estão apresentados estes fatores fixos e variáveis, e eles tem como finalidade diversificar a metodologia para que no final seja possível comparar os valores obtidos e decidir qual é a melhor situação e solução para o presente tema apresentado.

3.2.1. Fatores fixos

Os fatores fixos aplicados em ambos os conjuntos de corpos de prova foram o traço do concreto, a relação água/cimento, a forma e o tempo do processo de mistura dos componentes, o método de moldagem dos corpos de prova e o ensaio à compressão destes foi o mesmo para ambos os conjuntos.

Algumas delimitações foram utilizadas na pesquisa, como a fabricação do concreto foi em pequena escala realizado numa betoneira, foi utilizado corpos de prova com formato cilíndrico de tamanho 10 cm x 20 cm para obter a resistência à compressão, estes ensaios ocorreram com 1, 3, 7, 14, 28 e 42 dias após a moldagem.

Para o desenvolvimento do aplicativo também teve algumas delimitações, a principal delas é que o aplicativo foi desenvolvido somente para o sistema Android, este é disponibilizado em formato “.apk” (Android Package), este é o formato de arquivo usado para distribuir e instalar aplicativos no sistema Android.

3.2.2. Fatores variáveis

Como fator variável foi escolhido a temperatura imposta ao concreto durante o processo de cura, com essa variação da temperatura haverá uma diferença da maturidade entre os conjuntos, que reflete numa diferença na resistência à compressão para idades iguais. Um conjunto denominado de “cura submersa” teve a cura de forma submersa em água, enquanto o segundo conjunto denominado de “cura submersa + estufa”, teve a cura majoritariamente de forma submersa, porém, passou por ciclos de temperatura de 40°C em estufa durante os primeiros 4 dias.

3.3. ETAPA 1

Conforme apresentado no fluxograma, nesta primeira etapa é apresentado o traço do concreto, bem como disposta a caracterização dos materiais e a relação água/cimento utilizada. Ao fim desta etapa inicial temos os corpos de prova moldados.

3.3.1. Traço de estudo do concreto

O traço escolhido é proveniente de Câmara (2006), este é composto por cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, aditivo e água. A Tabela 2 disposta abaixo apresenta o traço escolhido.

Tabela 2 – Traço do concreto para o estudo

CP-IV RS	1
Agregado miúdo natural	0,819
Agregado miúdo de britagem	1,52
Agregado graúdo	0,668
Agregado graúdo	2,037
Água (l)	13,605
Aditivo superplastificante (l)	0,116

Fonte: Autor.

Na Tabela 3, temos a quantidade de cada material utilizado para produzir o concreto e moldar os 2 conjuntos de 18 corpos de prova, totalizando 36 corpos de prova.

Tabela 3 – Quantidade dos materiais utilizados

fck 30 (slump 10±2cm)	
Materiais	Quantidade
Cimento (kg)	24
Areia fina (kg)	19,66
Areia artificial (kg)	36,48
Brita 0 (kg)	16,03
Brita 1 (kg)	48,89
Água (l)	13,6
Aditivo superplastificante (l)	0,116

Fonte: Autor.

A escolha do uso do traço de 30 Mpa e do cimento CP-IV é devido ao vasto uso destes na região para estruturas em concreto armado, Câmara (2006) também

percebeu que na região de Florianópolis este traço era mais utilizado. O traço utilizado tem uma proporção de cimento/agregado de 1/5, que é considerado um traço rico em agregados e uma proporção de um concreto magro, que não possui resistências tão elevadas quanto um concreto estrutural.

3.3.2. Caracterização dos materiais utilizados

3.3.2.1. Cimento Portland

O cimento Portland utilizado é o CP IV RS 32 da marca Votorantim, as características deste estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades físicas e químicas disponibilizadas para Votorantim

PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS	
Estado físico	Sólido, pó cinza.
pH em Solução Aquosa	$12 \leq \text{pH} \leq 14$
Limite de Explosividade, % vol no ar	Nenhum
Massa Específica Aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³ a 20°C.
Massa Específica Absoluta	$2,8 \leq \gamma_r \leq 3,2$ g/cm ³ a 20°C.
Solubilidade em Água	até 1,5g/l a 20°C.

Fonte: Adaptado da Votorantim.

3.3.2.2. Agregados miúdos

No traço foram utilizados dois agregados miúdos, o agregado miúdo de origem natural e o agregado miúdo de britagem, as características de ambos estão dispostas nos itens abaixo.

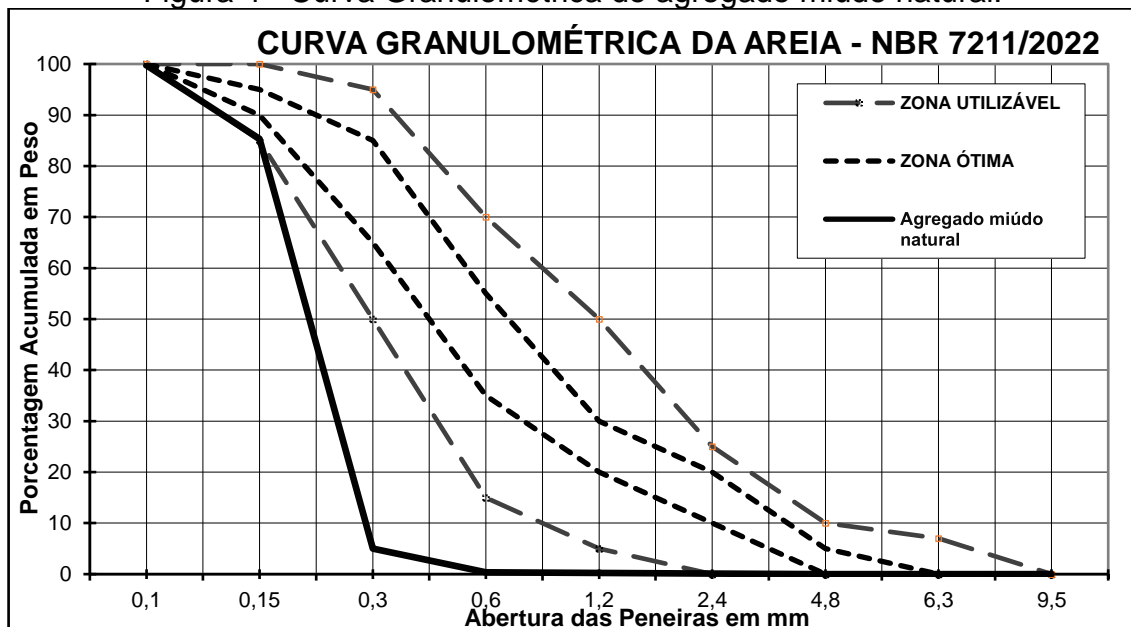
O agregado natural utilizado é proveniente da cidade de Bento Gonçalves, foi caracterizado conforme NBR 17054 (2022), e teve a massa específica determinada com uso da NBR 16916 (2021). Na Tabela 5 apresentada abaixo temos as propriedades do agregado miúdo natural, na Figura 4 também abaixo temos a curva granulométrica.

Tabela 5 - Propriedades do agregado miúdo natural.

Peneira (mm)	%Retida	%Retida Acumulada
	Agregado miúdo natural	
0,3	4	4
0,15	81	85
Fundo	14	100
Módulo de finura		0,91
Massa específica (g/cm ³)		2,65
Dimensão máxima característica (mm)		0,3

Fonte: Autor.

Figura 4 - Curva Granulométrica do agregado miúdo natural.



Fonte: Autor.

O agregado de britagem utilizado é proveniente da cidade de Bento Gonçalves, foi caracterizado conforme NBR 17054 (2022), e teve a massa específica determinada

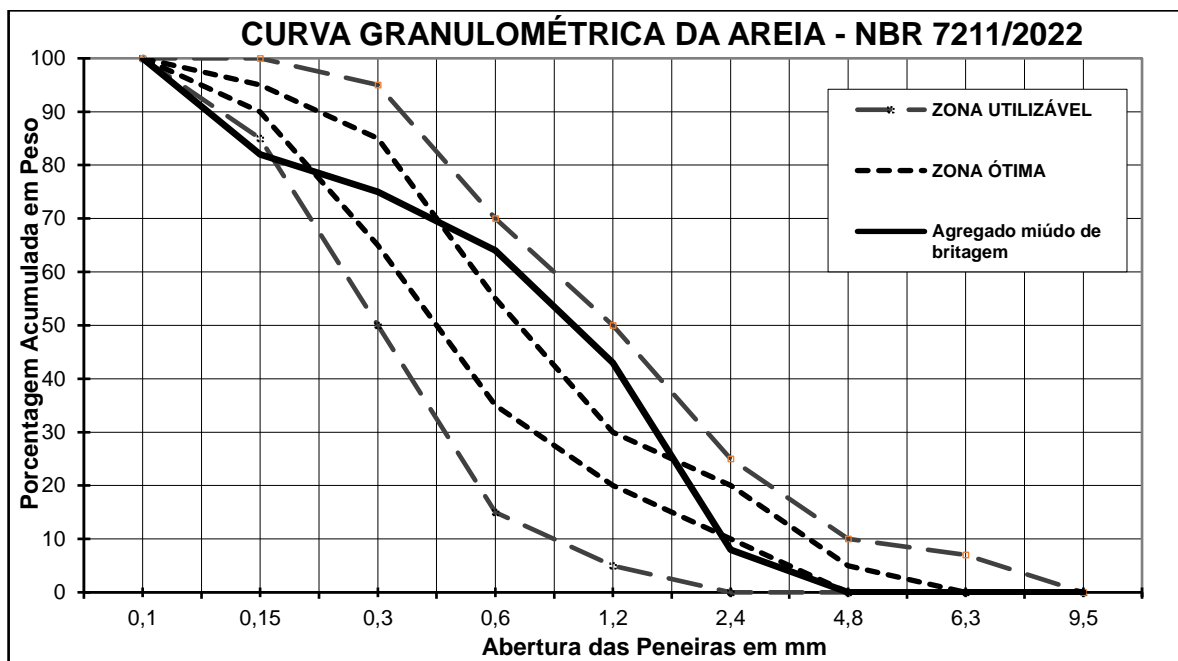
com uso da NBR 16916 (2021). Na Tabela 6 apresentada abaixo temos as propriedades do agregado miúdo de britagem, na Figura 5 também abaixo temos a curva granulométrica.

Tabela 6 - Propriedades do agregado miúdo de britagem.

Peneira (mm)	%Retida	%Retida Acumulada
	Agregado de Britagem	
2,4	8	8
1,2	35	43
0,6	21	64
0,3	11	75
0,15	7	82
Fundo	18	100
Módulo de finura		2,73
Massa específica (g/cm ³)		2,68
Dimensão máxima característica (mm)		4,8

Fonte: Autor.

Figura 5 - Curva Granulométrica do agregado miúdo de britagem.



Fonte: Autor.

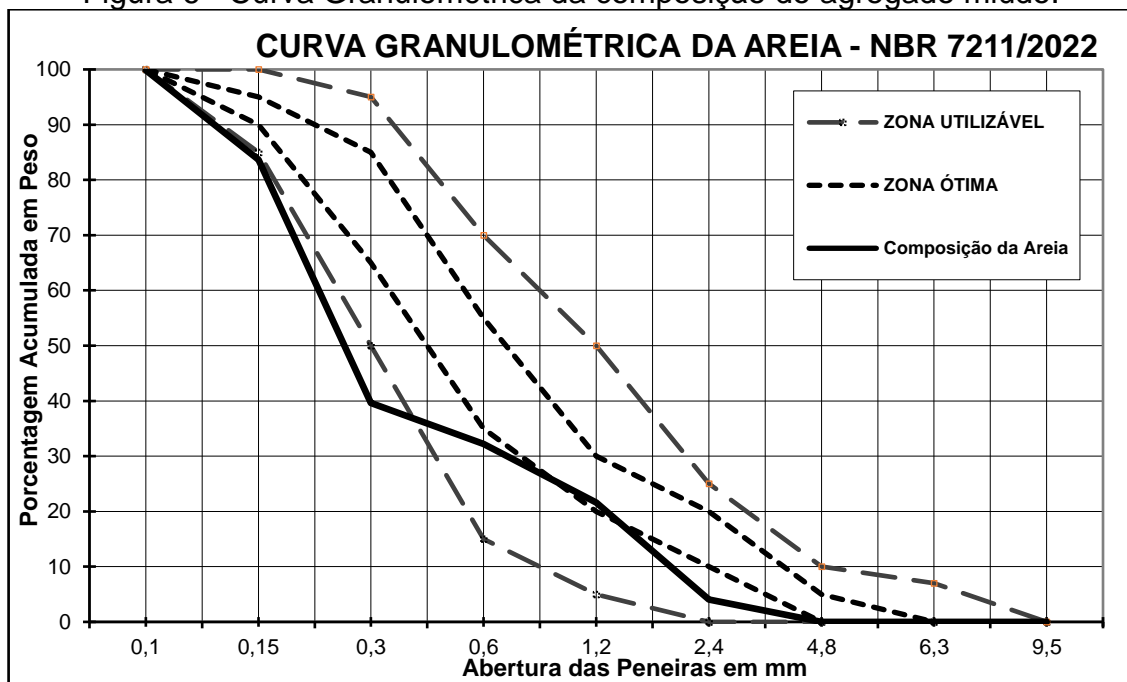
A composição da areia é de 35% de agregado miúdo natural e 65 de agregado miúdo de britagem. Na Tabela 7 apresentada abaixo temos as propriedades do agregado miúdo, na Figura 6 também abaixo temos a curva granulométrica.

Tabela 7 - Propriedades do agregado miúdo.

Peneira (mm)	%Retida	%Retida Acumulada
	Composição da Areia	
2,4	4	4
1,2	18	22
0,6	11	32
0,3	7	40
0,15	44	84
Fundo	16	100
Módulo de finura		1,81
Massa específica (g/cm ³)		2,66
Dimensão máxima característica (mm)		2,4

Fonte: Autor.

Figura 6 - Curva Granulométrica da composição do agregado miúdo.



Fonte: Autor.

3.3.2.3. Agregados graúdos

No presente trabalho foram utilizados dois agregados graúdos com algumas diferenças, as características de ambos estão dispostas abaixo.

O agregado de graúdo utilizado é proveniente da cidade de Bento Gonçalves, foi caracterizado conforme NBR 17054 (2022). Na Tabela 8 apresentada abaixo temos as propriedades do agregado graúdo.

Tabela 8 - Propriedades do agregado graúdo.

Peneira (mm)	%Retida	%Retida Acumulada
	Agregado Graúdo	
9,5	11	11
6,3	68	79
4,8	16	95
2,4	3	98
1,2	0	98
0,6	0	98
0,3	0	98
0,15	0	98
Fundo	2	100
Módulo de finura		5,98
Massa específica (g/cm ³)		2,69
Dimensão máxima característica (mm)		12,5

Fonte: Autor.

O agregado de graúdo utilizado é proveniente da cidade de Bento Gonçalves, foi caracterizado conforme NBR 17054 (2022). Na Tabela 9 apresentada abaixo temos as propriedades do agregado graúdo.

Tabela 9 - Propriedades do agregado graúdo.

Peneira (mm)	%Retida	%Retida Acumulada
	Agregado Graúdo	
12,5	37	37
9,5	31	68
6,3	29	97
4,8	2	99
2,4	0	99
1,2	0	99
0,6	0	99
0,3	0	99
0,15	0	99
Fundo	1	100
Módulo de finura		6,63
Massa específica (g/cm ³)		2,70
Dimensão máxima característica (mm)		19

Fonte: Autor.

3.3.2.4. Água

A água utilizada para execução do concreto é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Caxias do Sul.

3.3.2.5 Aditivo

O aditivo utilizado é um superplastificante da marca Sika, este é nomeado ViscoCrete 6090HW, é um aditivo líquido superplastificante de pega normal de terceira geração baseado na tecnologia de polímeros policarboxilatos. Este tem como principais características diminuir o uso de água, proporcionar um efeito plastificante com melhoria no comportamento da fluidez e uma melhoria no comportamento da retração.

3.3.3. Produção do concreto e moldagem

A mistura do concreto foi realizada nas dependências da faculdade em Caxias do Sul, com o auxílio de uma betoneira intermitente. O tempo de adição dos materiais e do processo de homogeneização da mistura foi de 15 ± 3 minutos. A ordem em que os materiais foram inseridos na betoneira foi a seguinte:

- a) Agregado graúdo;
- b) 70% de água;
- c) Cimento;
- d) Agregado miúdo;
- e) 30% de água;
- f) Aditivo;

Posteriormente a etapa de mistura dos materiais na betoneira foi realizado o teste de consistência do concreto com uso do ensaio do abatimento de tronco de cone, conforme descrito na ABNT NBR 16889 (2020). O tempo para realizar o ensaio do slump foi de 6 ± 2 minutos.

O processo para moldagem dos corpos de prova seguiu a NBR 5738 (2015), esta abrange os formatos cilíndricos, onde é necessário a altura possuir no mínimo duas vezes o diâmetro.

Neste presente trabalho foram utilizados moldes que possuem formato cilíndricos, o diâmetro e altura dos moldes utilizados são respectivamente de 10 cm e 20 cm. O material destes moldes não reage com o Cimento Portland, o desmoldante utilizado também não reage quando está em contato com o cimento.

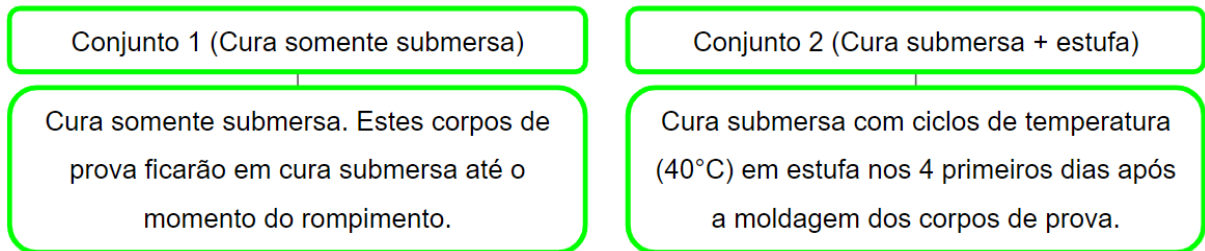
3.4. ETAPA 2

Conforme apresentado no fluxograma nesta etapa é realizada a cura dos corpos de prova e o monitoramento e gravação da temperatura durante este processo.

3.4.1. Cura dos corpos de prova

Conforme visto anteriormente temos dois conjuntos de corpos de prova, cada um destes terá uma condição de cura, a Figura 7 demonstra o conjunto e sua respectiva condição de cura.

Figura 7 - Conjunto e sua respectiva forma de cura.



Fonte: Autor.

O conjunto 1, também denominado de “cura submersa”, teve a sua cura submersa desde a desmoldagem até o momento do rompimento.

O conjunto 2, também denominado de “cura submersa + estufa”, foi submetido a ciclos de temperatura elevadas em estufa nos 4 primeiros dias após a moldagem, o intervalo de tempo em que estes foram submetidos em temperatura de 40°C em estufa está disposto na Tabela 10.

Tabela 10 - Intervalo de tempo de cura em 40°C em estufa.

Dia		Início	Término	Tempo na Estufa (Horas)
08/05/2023	Segunda	Término da moldagem (19:25)		
09/05/2023	Terça	17:00:00	19:00:00	02:00:00
10/05/2023	Quarta	14:20:00	19:20:00	05:00:00
11/05/2023	Quinta	14:20:00	19:20:00	05:00:00
12/05/2023	Sexta	14:20:00	19:20:00	05:00:00
Intervalo de tempo total a 40°C em estufa (Horas)				17:00:00

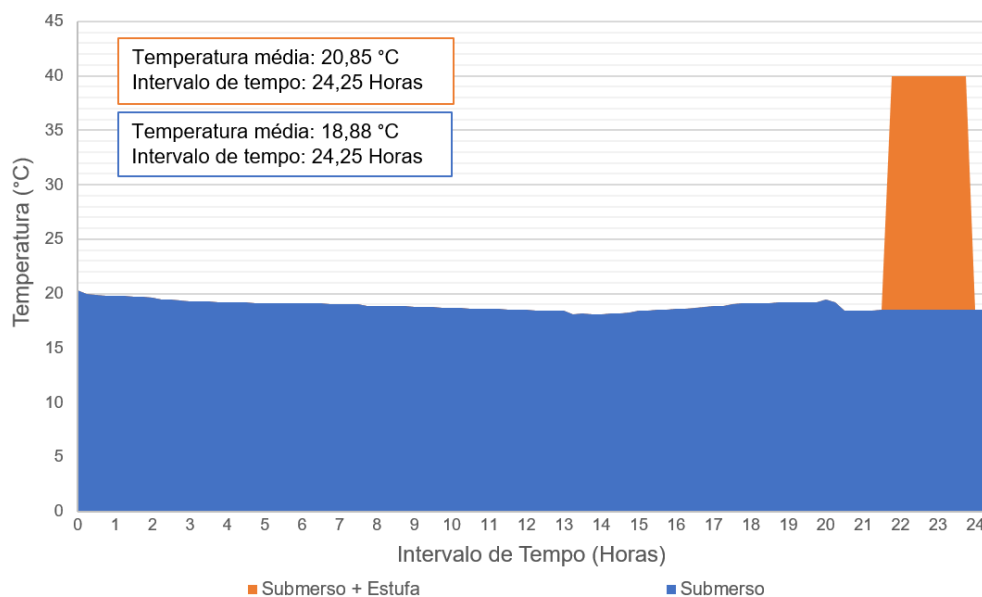
Fonte: Autor.

3.4.2. Monitoramento da temperatura de cura

Para realizar o monitoramento da temperatura dos corpos de prova durante o processo de cura foi utilizado um datalogger, além de monitorar este gravou os dados da temperatura durante o processo de cura.

O datalogger utilizado é o RC-4 da marca Elitech, este é um registrador de dados de temperatura capaz de realizar 16 mil leituras, possui o intervalo de gravação ajustável entre a faixa de 10 segundos a 24 horas. O intervalo de tempo definido para a medição foi de 15 minutos, a medição tem o seu início após o término da moldagem dos corpos de prova, posteriormente os dados gravados pelo datalogger foram coletados em forma de planilha excel, com estes dados foram gerados os gráficos da temperatura-tempo, na Figura 8 pode-se ver o gráfico da temperatura em relação ao tempo para o ensaio com 1 dia.

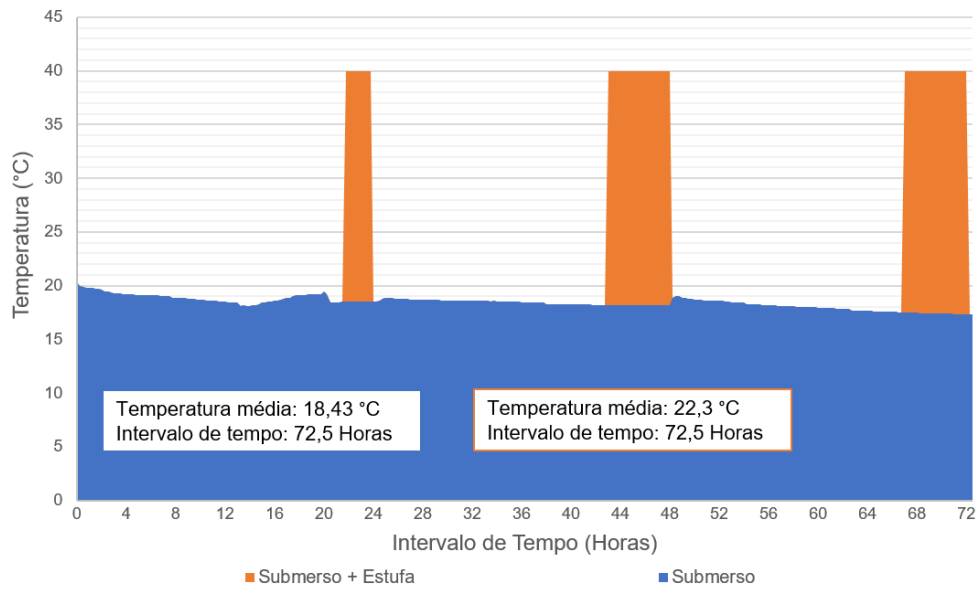
Figura 8 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 1 dia.



Fonte: Autor.

Na Figura 9, apresentada abaixo pode-se ver o gráfico da temperatura em relação ao tempo para o ensaio com 3 dias.

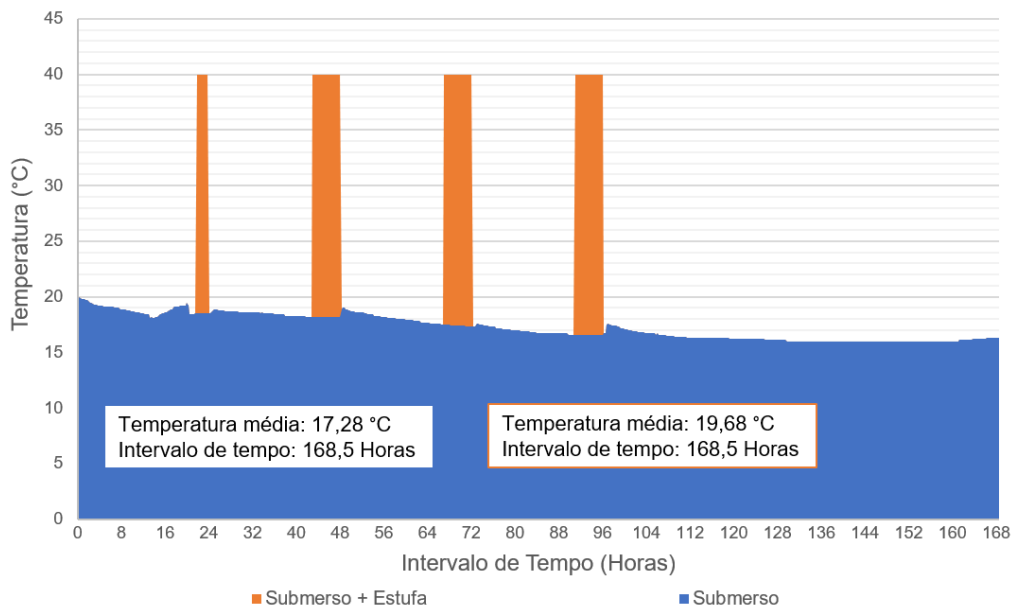
Figura 9 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 3 dias.



Fonte: Autor.

Na Figura 10, apresentada abaixo pode-se ver o gráfico da temperatura em relação ao tempo para o ensaio com 7 dias.

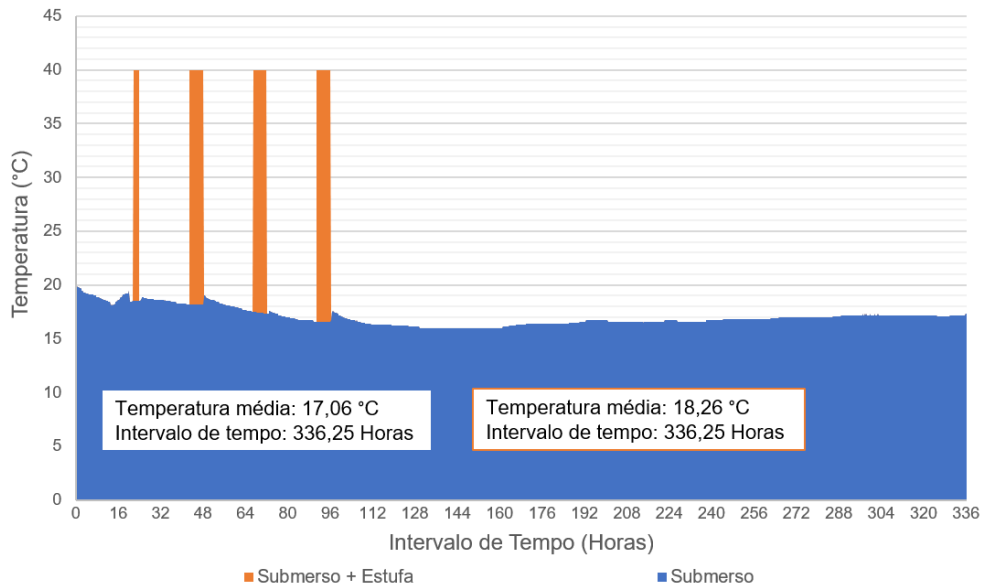
Figura 10 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 7 dias.



Fonte: Autor.

Na Figura 12, apresentada abaixo pode-se ver o gráfico da temperatura em relação ao tempo para o ensaio com 14 dias.

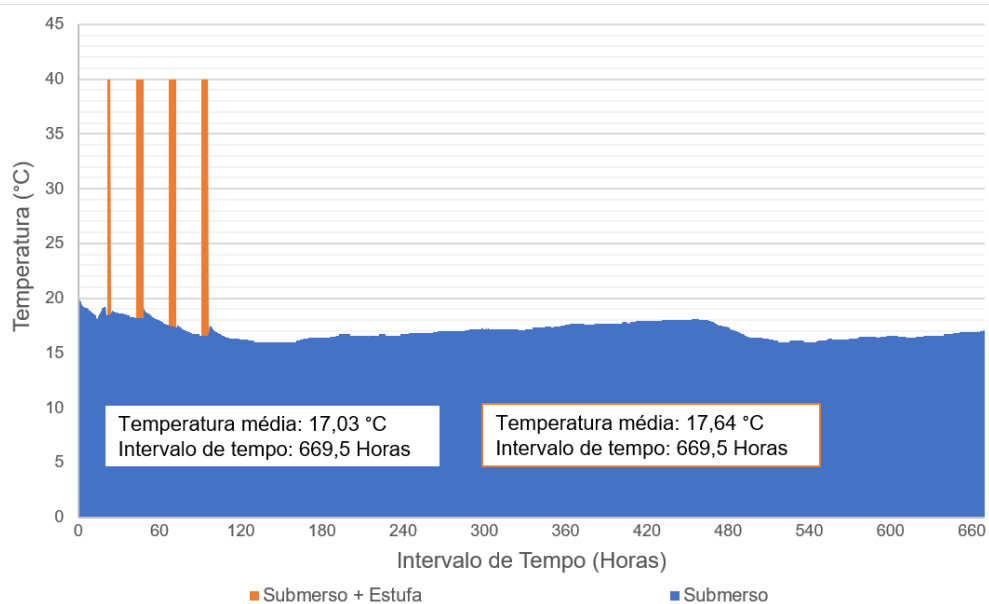
Figura 11 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 14 dias.



Fonte: Autor.

Na Figura 13, apresentada abaixo pode-se ver o gráfico da temperatura em relação ao tempo para o ensaio com 28 dias.

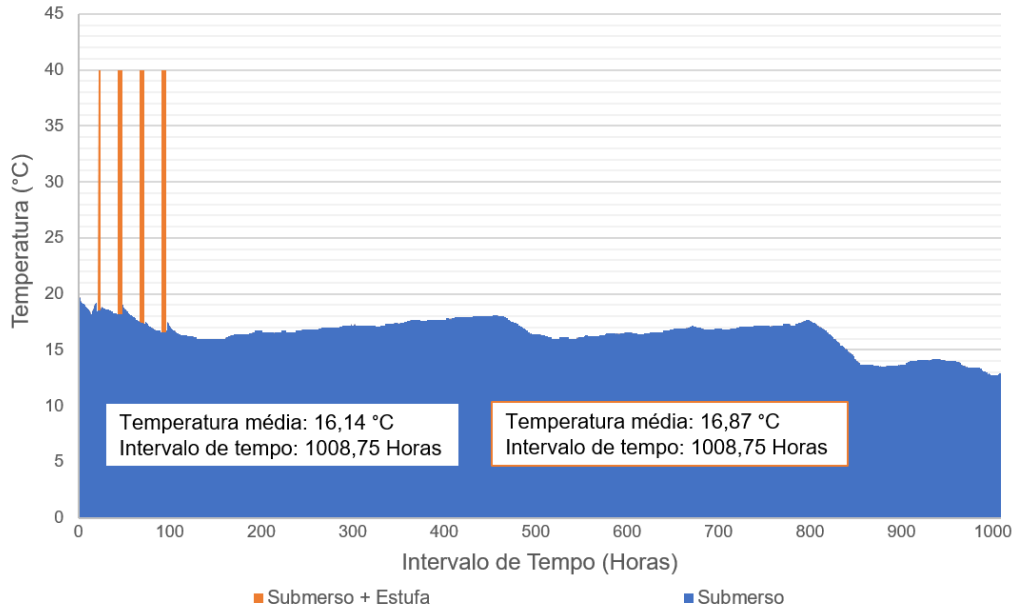
Figura 12 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 28 dias.



Fonte: Autor.

Na Figura 14, apresentada abaixo pode-se ver o gráfico da temperatura em relação ao tempo para o ensaio com 42 dias.

Figura 13 - Gráfico do esquema temperatura-tempo para ambos os conjuntos para o ensaio com 42 dias.



Fonte: Autor.

3.5. ETAPA 3

3.5.1. Ensaio de resistência à compressão

O ensaio dos corpos de prova do traço utilizado neste estudo tem como objetivo medir a resistência à compressão, isto para posteriormente ser comparado com o resultado obtido com o uso do método da maturidade.

Os ensaios seguem a NBR 5739 (2018), onde basicamente o corpo de prova é posicionado entre dois pratos denominados de pratos de compressão e é aplicada uma carga vertical centrada na face destes. As idades de rompimentos destes são as seguintes: 1, 3, 7, 14, 28 e 42 dias, para cada idade foram ensaiados 3 corpos de prova de cada conjunto.

3.6. ETAPA 4

Conforme descrito anteriormente na quarta etapa é calculado o índice de maturidade para cada idade de rompimento e correlacionado com a resistência à compressão obtida, também é gerado o gráfico de pontos e obtida a curva e equação para poder estimar a resistência conforme o método propõe.

3.6.1. Cálculo da maturidade

Para determinar a maturidade foi utilizada a equação 1 apresentada no item 2.4.1.2., conforme visto anteriormente é necessário o dado da temperatura média durante a cura dos corpos de prova, bem como o intervalo de tempo desde o término da moldagem até o momento do rompimento de forma aproximada. Também é necessário a temperatura de base, está foi definida como 0°C seguindo as considerações da ASTM C1074 (2011), assumir a temperatura de base como 0°C é uma abordagem conservativa, visto que não há ganho de resistência se o concreto ficar abaixo da temperatura onde há o congelamento da água (GIATEC, 2020).

3.6.2. Gerar a curva maturidade x resistência

Para gerar o gráfico de pontos foram utilizados os valores da resistência à compressão e o seu valor de maturidade respectivo, foi gerada a melhor curva logarítmica que se adequa aos valores utilizados. O desenvolvimento do gráfico e da curva foi feita no Excel, uma planilha eletrônica.

3.6.3. Obter a equação da curva para estimar a resistência

A ASTM C1074 (2011) indica que para obter a equação pode se expressar a resistência como uma função linear do logaritmo do índice de maturidade, este processo foi desenvolvido no excel.

3.6.4. Estimativa da resistência

Para estimar a resistência à compressão é utilizado a equação obtida de um dos dois conjuntos de corpos de prova, e os valores da maturidade do outro conjunto de corpos de prova que foi submetido a uma cura diferente, os valores então são comparados para verificar a aplicação do método da maturidade. Também é considerado o “R²” da equação, conhecido como coeficiente de determinação, é uma medida estatística utilizada para avaliar a qualidade de ajuste de uma equação de regressão aos valores observados, este coeficiente varia de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste da equação aos dados.

3.7. ETAPA 5

Nesta etapa é descrito como foi o desenvolvimento do aplicativo para estimar a resistência à compressão do concreto com uso do método da maturidade.

3.7.1. Desenvolvimento do aplicativo

O desenvolvimento do aplicativo foi realizado no Android Studio, este é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) específico para desenvolver aplicações

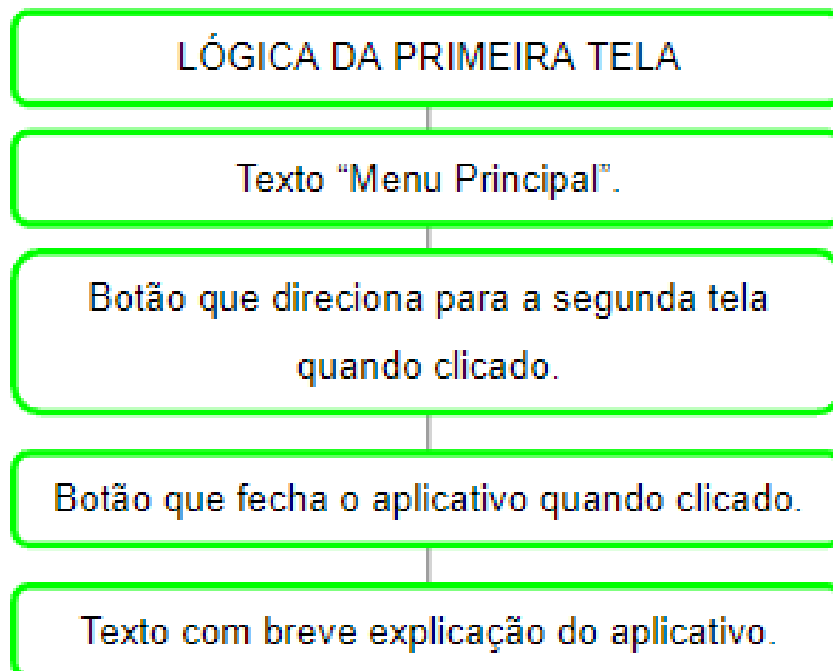
para Android, ele fornece um conjunto abrangente de ferramentas e recursos para facilitar o desenvolvimento de aplicativos móveis.

No Android Studio foi desenvolvido a interface gráfica do aplicativo, que consiste principalmente das telas com textos, entradas de texto e botões para exercer funções. O código para executar as ações foi desenvolvido em Java que é uma das linguagens que o Android Studio suporta, a linguagem Java é amplamente utilizada no mundo do desenvolvimento de softwares e aplicações, ela é considerada robusta e segura.

3.7.2. Lógica do aplicativo

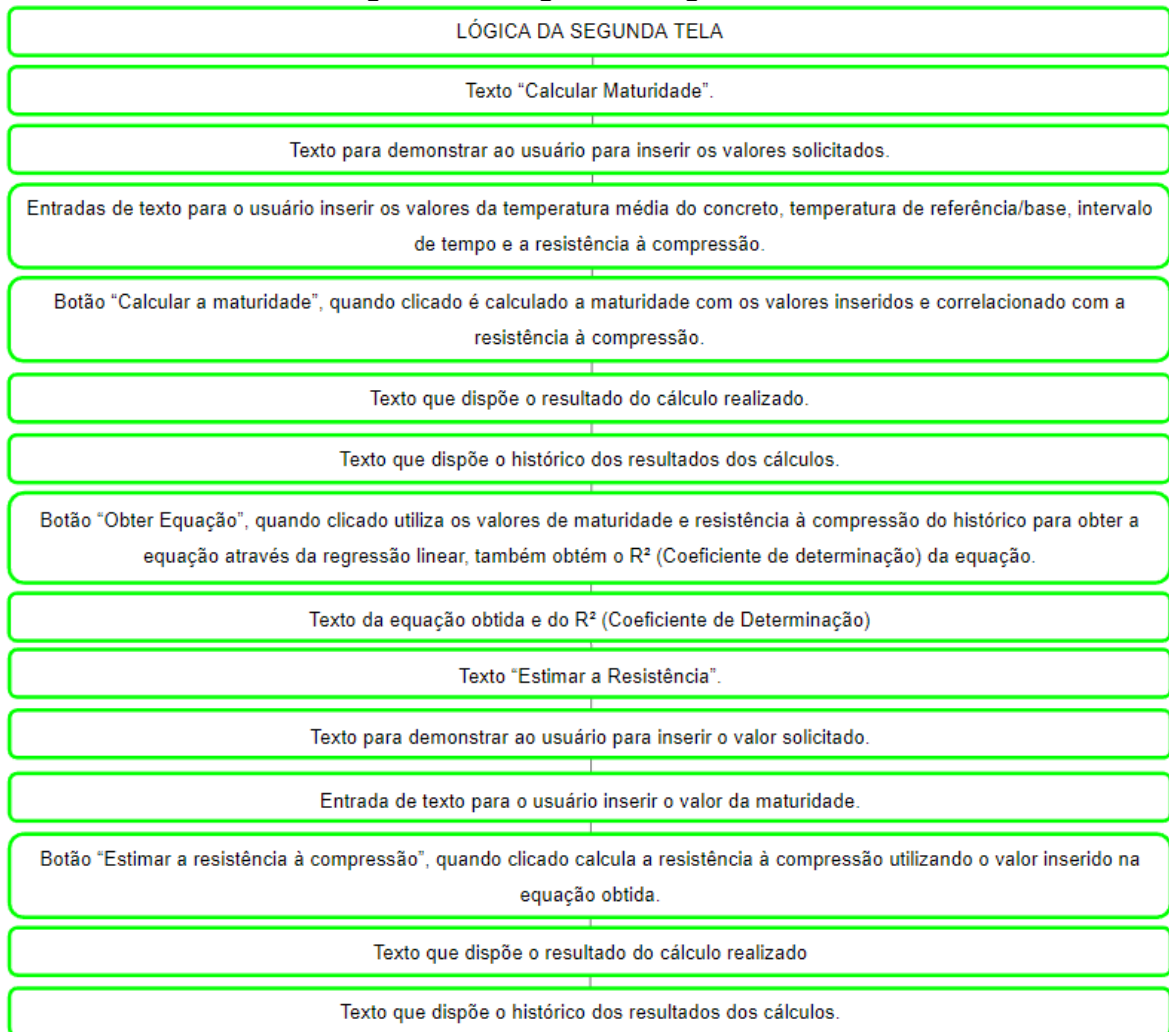
O aplicativo foi desenvolvido com duas telas, a primeira o menu principal e a segunda a tela para cálculo da maturidade e estimativa da resistência, a Figura 14 demonstra a lógica utilizada no menu principal, e a Figura 15 demonstra a lógica da segunda tela.

Figura 14 - Lógica da primeira tela do aplicativo.



Fonte: Autor.

Figura 15 - Lógica da segunda tela.



Fonte: Autor.

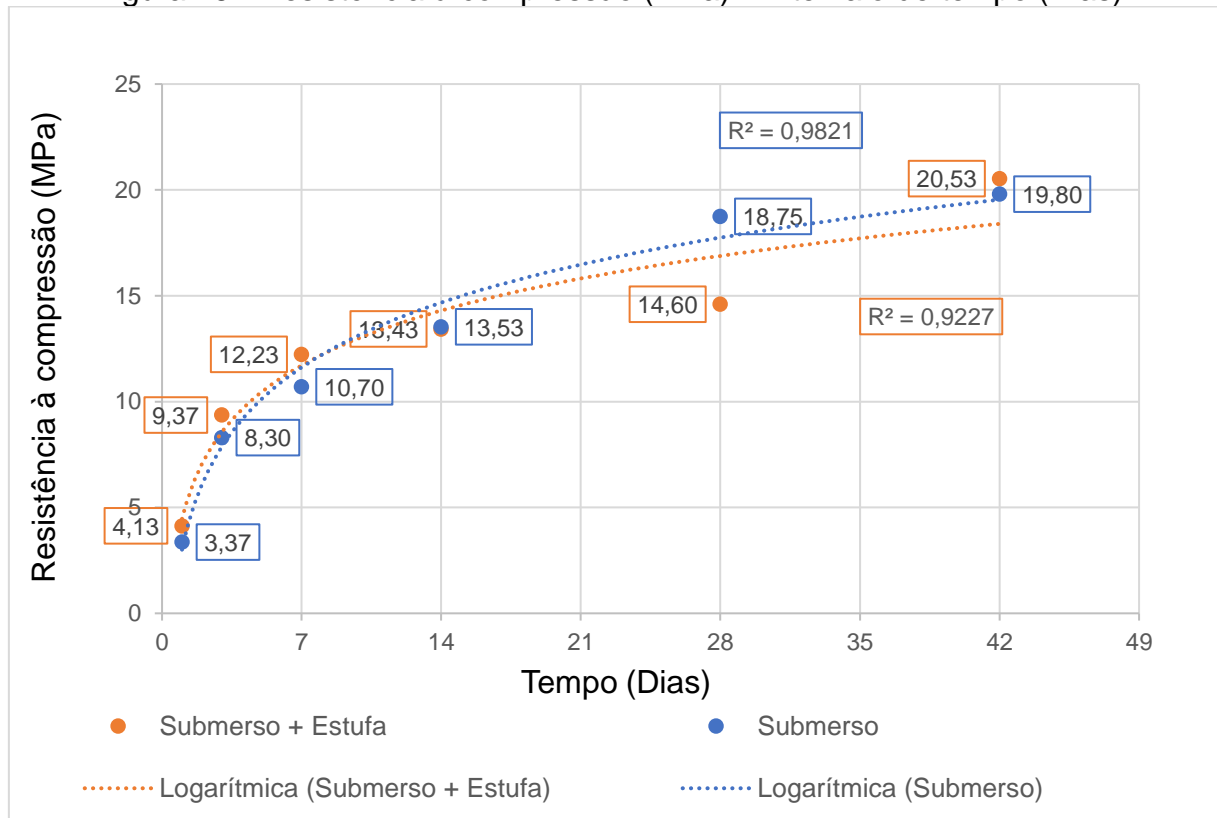
4. RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados conforme proposto neste trabalho, e foi realizada a análise destes com o intuito de destacar as principais relevâncias. Os resultados foram dispostos em formato de gráficos e tabelas para facilitar a visualização.

4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os valores da resistência à compressão obtidos estão dispostos na Figura 16 apresentada abaixo, os valores da resistência à compressão disposto são a média dos valores dos 3 corpos de prova ensaiados para cada conjunto, no apêndice A está disposta em forma de tabela que demonstra detalhadamente estes valores.

Figura 16 - Resistência à compressão (MPa) x Intervalo de tempo (Dias).



Fonte: Autor.

O concreto utilizado não atingiu a resistência à compressão esperada, isso deve-se principalmente ao uso do cimento CP-IV, conforme a própria marca apresenta este pode conter uma porcentagem de 60% de componentes como a pozolana e material carbonático, reduzindo para 40% a quantidade de clínquer + gesso.

O gráfico demonstra que nos dias 1, 3 e 7 os valores de resistência à compressão do concreto que teve sua cura com ciclos de temperaturas elevadas é maior, para Kim *et al.* (2002), a hidratação é acelerada em temperaturas altas, enquanto em temperaturas baixas é reduzida, ressalta também que concretos que em idades iniciais que são submetidos a temperaturas maiores alcançam mais cedo altas resistências, porém tem sua taxa de crescimento da resistência diminuída ao longo do tempo.

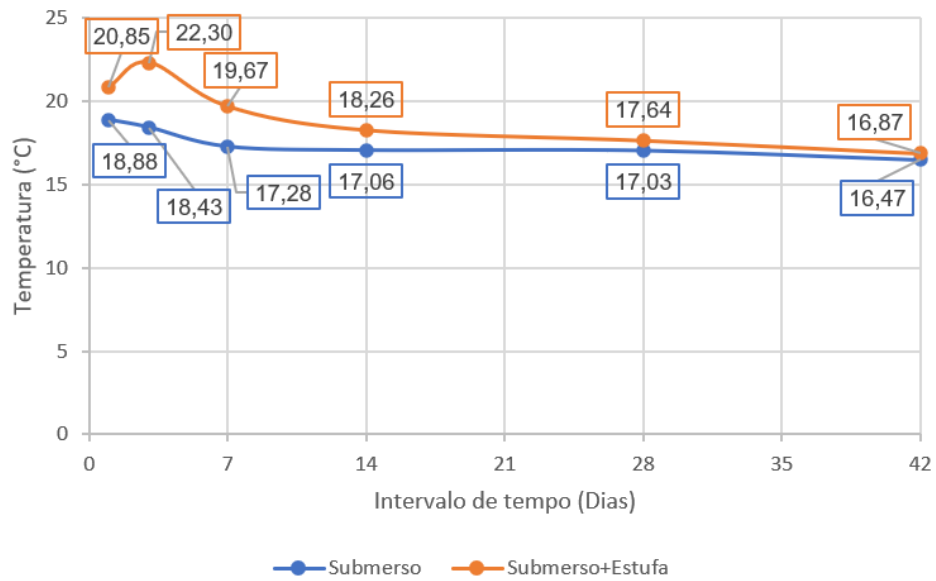
Mehta e Monteiro (2008), apresentam o efeito da temperatura de cura no concreto em idades iniciais, a temperatura tem uma influência em dois sentidos controversos, onde temperaturas mais altas geram um aumento na resistência do concreto, porém, em idades consideradas mais avançadas esta situação inverte, pois, temperaturas mais baixas desenvolvem uma microestrutura uniforme da pasta, tendo uma maior resistência final. No gráfico é possível reparar que as curvas logarítmicas inverteram de lugar, porém o concreto que teve a cura submersa + estufa ainda teve a resistência à compressão maior aos 42 dias.

4.2. INDICE DE MATURIDADE

O índice de maturidade foi calculado com a equação do fator tempo-temperatura, os valores necessários para calcular são a temperatura média do concreto do término da moldagem até o rompimento, este intervalo de tempo e a temperatura de base, definida como 0°C.

Na Figura 17, apresentada abaixo temos os valores médios da temperatura do concreto para cada idade de rompimento, é possível notar que há uma diferença considerável nas primeiras 3 idades de rompimentos (1, 3 e 7 dias), isso deve-se aos períodos em temperatura de 40°C em estufa que o conjunto teve.

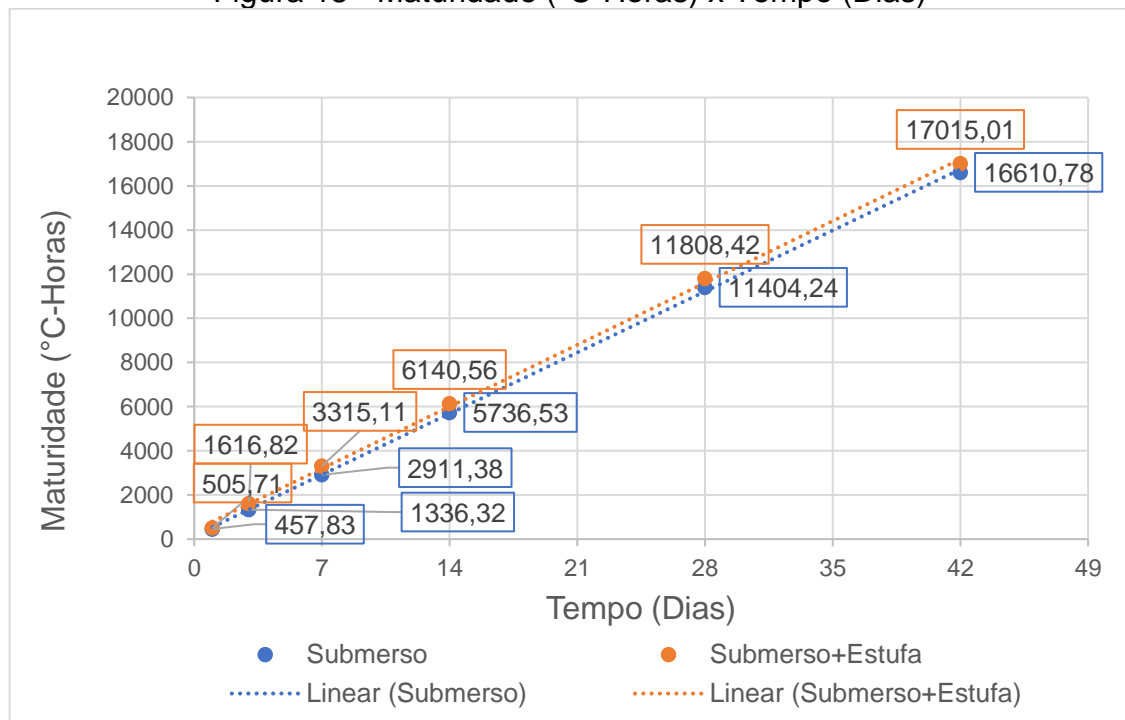
Figura 17 - Temperatura média para cada idade de rompimento.



Fonte: Autor.

Na Figura 18, disposta abaixo temos os valores de maturidade calculados para cada idade de rompimento, como o gráfico dispõe o conjunto de corpos de prova que teve a cura submersa + estufa sempre tem uma maturidade maior, devido a ter passado por temperaturas maiores em estufa. Os dados detalhados para calcular a maturidade para cada idade estão apresentados no apêndice B.

Figura 18 - Maturidade (°C-Horas) x Tempo (Dias)



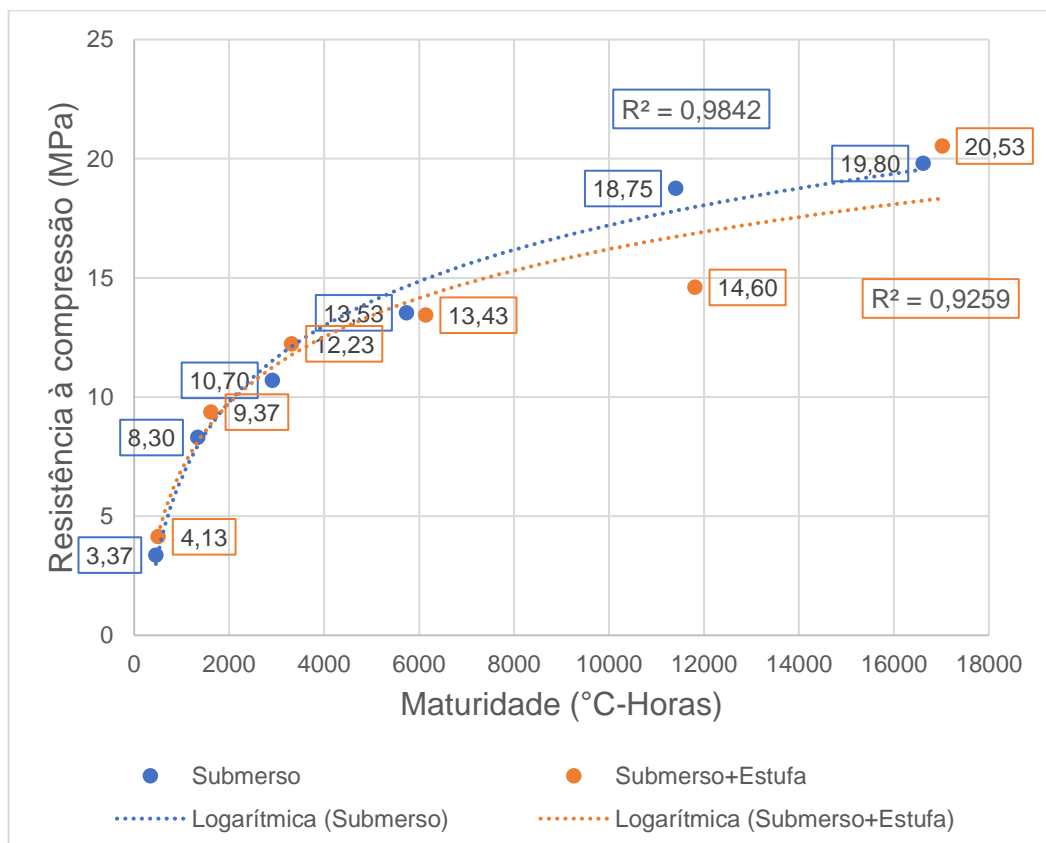
Fonte: Autor.

Os valores dos corpos de prova com a cura submersa + estufa tem uma diferença maior nos dias 1, 3 e 7 em relação ao que tiveram a cura somente submersa, a diferença percentual sendo de 9,5% para 1 dia, 17,3% para 3 dias e 12,2% para 7 dias. Isso deve-se aos ciclos de temperatura que o conjunto foi submetido durante os 4 primeiros dias. Para as outras idades a diferença percentual foram inferiores a 7%.

4.3. CURVA DE MATURIDADE X RESISTÊNCIA

Com uso dos dados da resistência à compressão conforme disposto no item 4.1. e uso dos valores da maturidade apresentados no item 4.2., é gerado o gráfico de pontos e desenhada a curva logarítmica que melhor se adequa aos valores utilizados. Na Figura 19, apresentada abaixo temos este gráfico da maturidade x resistência à compressão. Os valores de maturidade e resistência à compressão para gerar este gráfico estão dispostos no apêndice C.

Figura 19 - Maturidade (°C-Horas) x Resistência à compressão.

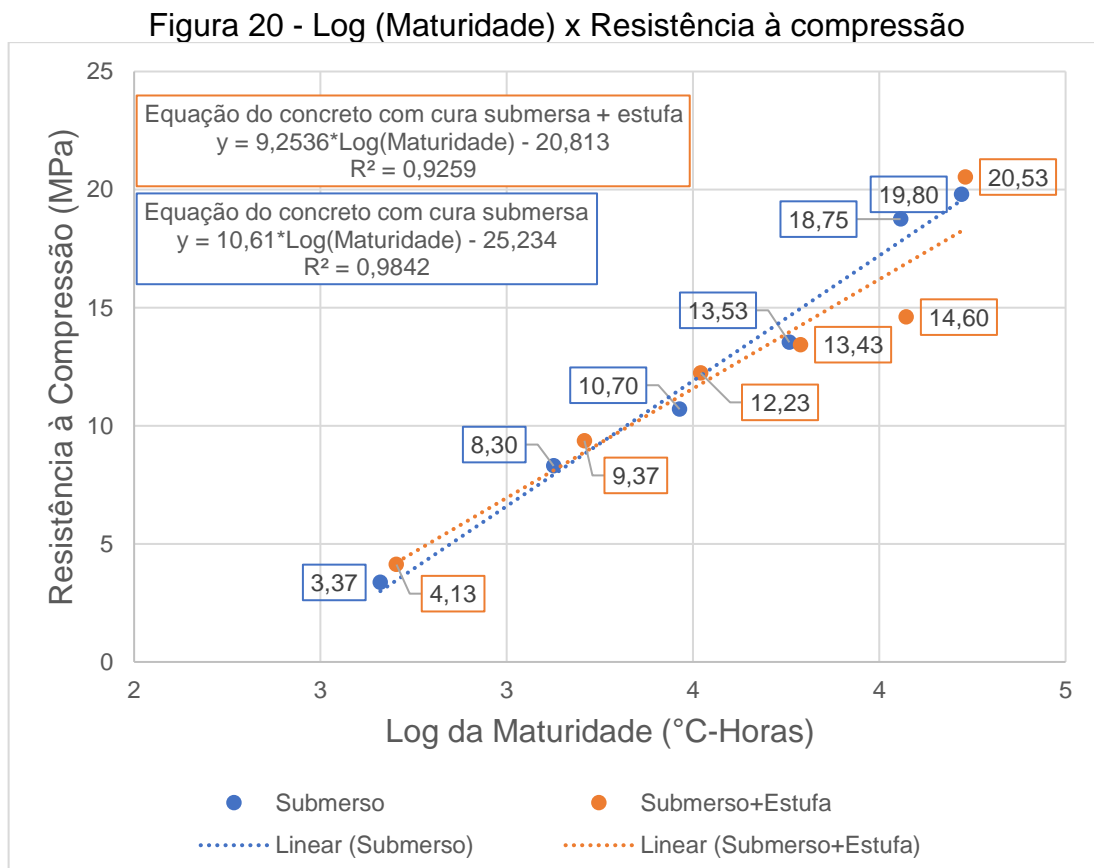


Fonte: Autor.

No gráfico é possível verificar que nos 7 primeiros dias os pontos maturidade maior tem uma maior resistência, já a partir do 14 dia houve a inversão dos valores, isso devido aos ciclos de temperatura que afetam a estrutura do concreto.

4.4. EQUAÇÃO PARA ESTIMAR A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A equação foi obtida conforme o item 3.7.3., o processo foi realizado no excel, onde os valores do logaritmo da maturidade são utilizados juntamente com a resistência condizente para gerar o gráfico de pontos, e é desenhada a linha de tendência linear que melhor se adequa aos valores. A Figura 20, apresentada abaixo apresenta as linhas de tendencias para ambos os conjuntos de corpos de prova, também é apresentado a equação e o seu coeficiente de determinação R^2 .



Fonte: Autor.

Como é possível reparar as linhas de tendencia também inverteram, a linha de tendência e a equação dos corpos de prova com cura submersa representa com

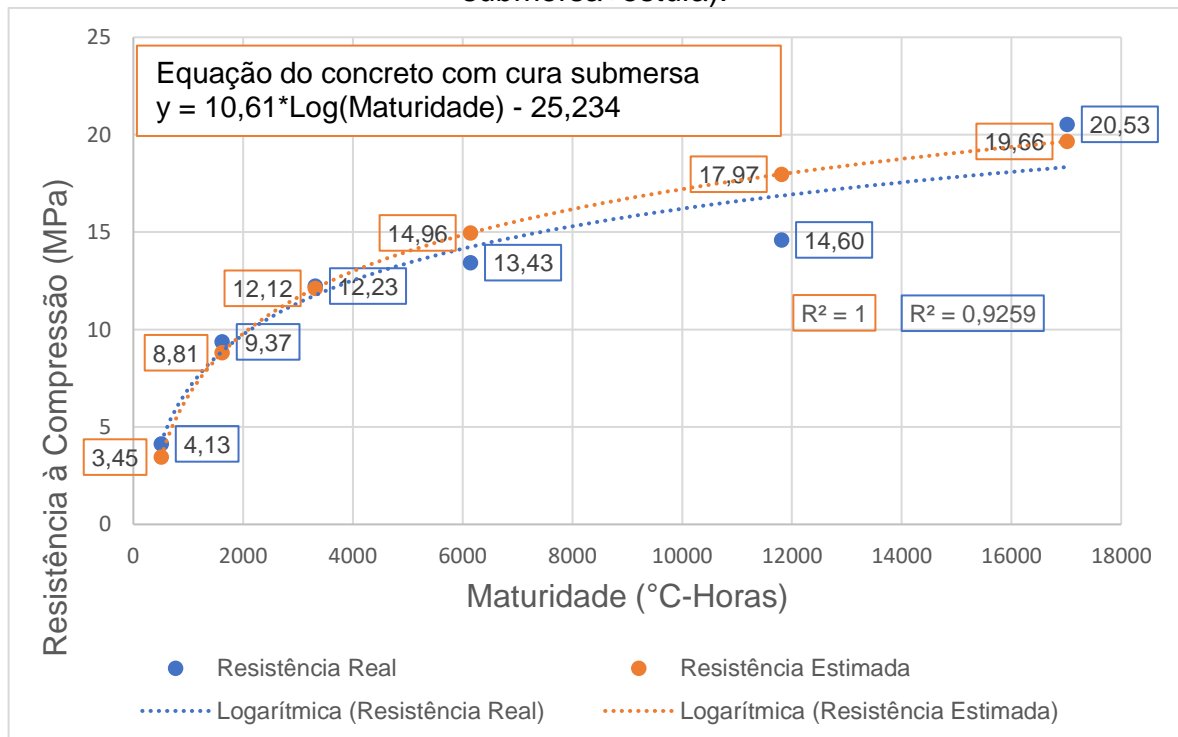
98,42% os valores utilizados, enquanto a linha de tendência e equação dos corpos de prova com cura submersa + estufa representa 92,59% os valores utilizados.

4.5. ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA PELA EQUAÇÃO OBTIDA

Com a equação obtida é possível estimar a resistência com uso dos valores de maturidade, os valores de maturidade do concreto com cura submersa serão utilizados na equação do concreto com cura submersa + estufa, e vice-versa. Também será demonstrado a diferença entre o valor estimado e o valor real obtido pelo ensaio mecânico para os mesmos valores de maturidade.

Na Figura 21, disposta abaixo temos os valores estimados comparados com os valores reais para uma mesma maturidade, os valores reais utilizam a maturidade e resistência à compressão do concreto que teve a cura submersa + estufa, já os valores estimados fazem uso dos valores de maturidade do concreto que teve a cura submersa + estufa na equação obtida do concreto com cura somente submersa.

Figura 21 - Comparação entre os valores reais da resistência (concreto com cura submersa+estufa) vs. valores estimados pela equação obtida (concreto com cura somente submersa) com uso dos valores de maturidade (concreto com cura submersa+estufa).



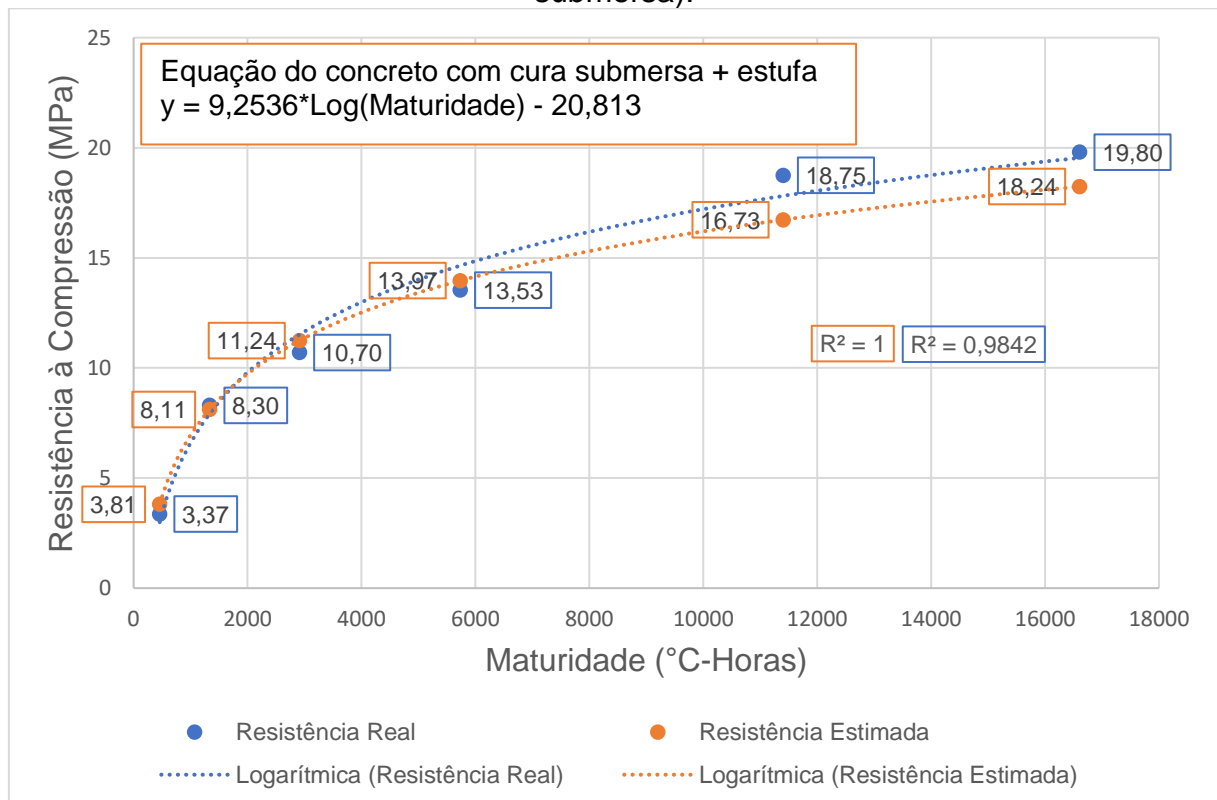
Fonte: Autor.

O R^2 obtido para os valores estimados é de 1, considerado como perfeito, isso é devido aos valores estimados serem calculados através de uma equação.

Os valores apresentam uma diferença de percentual aceitável, somente os valores estimados para 14 e 28 dias que superestimam a resistência, com uma diferença de 11,36% e 23,10% respectivamente.

Na Figura 22, disposta abaixo temos os valores estimados comparados com os valores reais para uma mesma maturidade, os valores reais utilizam a maturidade e resistência à compressão do concreto que teve a cura somente submersa, já os valores estimados fazem uso dos valores de maturidade do concreto que teve a cura somente submersa na equação obtida do concreto com cura submersa + estufa.

Figura 22 - Comparação entre os valores reais da resistência (concreto com cura somente submersa) vs. valores estimados pela equação obtida (concreto com cura submersa+estufa) com uso dos valores de maturidade (concreto com cura somente submersa).



Fonte: Autor.

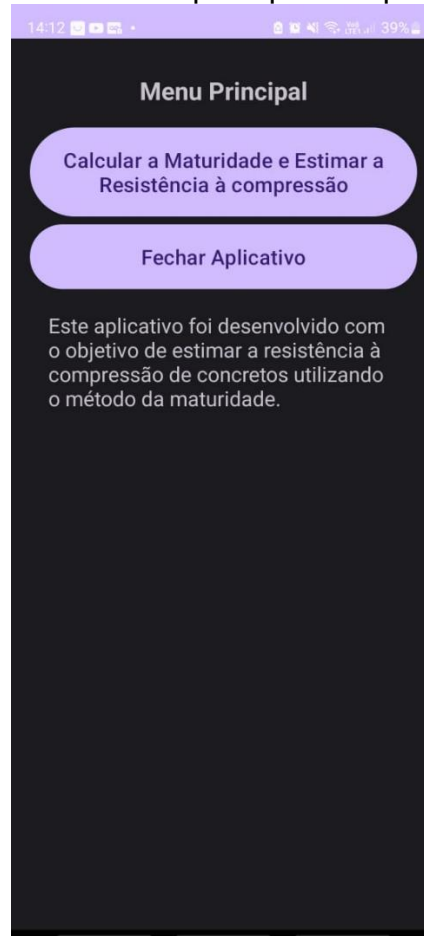
Os valores obtidos neste caso apresentam uma diferença percentual consideravelmente melhor que o anterior, visto que as duas maiores diferenças são de 13,11% e -10,78% respectivamente para o concreto com 1 e 28 dias.

A fim de verificar os resíduos das equações foi estimado a resistência à compressão com uso da equação e do valor de maturidade do mesmo conjunto, a maior parte dos valores de resíduos se mostraram com uma diferença menor de 10%, reforçando que as equações obtidas podem ser utilizadas para estimar a resistência à compressão destes concretos. Os valores utilizados estão dispostos no apêndice D.

4.6. APLICATIVO DESENVOLVIDO

O aplicativo desenvolvido para o sistema Android consiste em duas telas, a primeira delas o menu principal, e a segunda que é a página onde é estimado a resistência à compressão. A Figura 23 apresentada abaixo demonstra a tela principal do aplicativo.

Figura 23 - Menu principal do aplicativo.



Fonte: Autor.

No menu principal temos dois botões, o primeiro quando clicado direciona o usuário a tela de cálculo da maturidade e estimativa da resistência à compressão, já o segundo encerra a aplicação. Também temos um texto que descreve sobre o aplicativo.

Quando o primeiro botão, com o nome de “Calcular a maturidade e estimar a resistência à compressão” é clicado ele direciona para a segunda tela, o layout desta está disposta na Figura 24 apresentada abaixo.

Figura 24 - Tela para cálculo da maturidade e estimar a resistência à compressão.

The screenshot shows a mobile application interface with a dark background and white text. At the top, there is a status bar with the time 14:17 and battery level 38%. The main content is divided into two sections:

Calcular Maturidade
 Insira os valores para calcular a maturidade. Correlacione a maturidade com a sua respectiva resistência à compressão para gerar a equação.
 Temperatura média do concreto (°C)
 Temperatura de referência (°C)
 Intervalo de tempo (horas)
 Resistência à Compressão (MPa)
 Calcular Maturidade
 Resultado
 Histórico de valores de maturidade e resistência

Obter Equação
 Equação

Estimar a Resistência
 Estime a resistência à compressão com uso do valor da maturidade
 Insira a maturidade (°C-Horas)
 Estimar a resistência à compressão
 Resistência:
 Histórico de Valores de Resistência Estimada:

Fonte: Autor.

O layout desta página está dividido em duas etapas, a primeira o cálculo da maturidade e obtenção da equação, na Figura 25 apresentada abaixo temos o cálculo da maturidade com uso dos valores do concreto que teve sua cura somente submersa, os valores obtidos para maturidade e a equação são os mesmo que obtidos anteriormente.

Figura 25 - Cálculo da maturidade e obtenção da equação no aplicativo.

The screenshot shows a mobile application interface with a dark background and purple accents. At the top, the status bar shows the time 14:21 and battery level 38%. The main content is organized into two sections:

Calcular Maturidade
 Insira os valores para calcular a maturidade. Correlacione a maturidade com a sua respectiva resistência à compressão para gerar a equação.

Temperatura média do concreto (°C)

Intervalo de tempo (horas)

Resistência à Compressão (MPa)

Calcular Maturidade

Resultado
 Maturidade: 16614.11°C-Horas | Resistência: 19.8 MPa
 Histórico de valores de maturidade e resistência
 Maturidade: 457.84°C-Horas | Resistência: 3.37 MPa
 Maturidade: 1336.18°C-Horas | Resistência: 8.3 MPa
 Maturidade: 2911.68°C-Horas | Resistência: 10.7 MPa
 Maturidade: 5736.42°C-Horas | Resistência: 13.53 MPa
 Maturidade: 11401.59°C-Horas | Resistência: 18.75 MPa
 Maturidade: 16614.11°C-Horas | Resistência: 19.8 MPa

Obter Equação

Equação
 Resistência (MPa) = -25.23 + 10.61*log(Maturidade)
 Coeficiente de Determinação (r²): 0.98

Estimar a Resistência
 Estime a resistência à compressão com uso do valor da maturidade

Insira a maturidade (°C-Horas)

Estimar a resistência à compressão

Fonte: Autor.

Na segunda parte da tela temos a estimativa da resistência à compressão, na Figura 26 apresentada abaixo temos a realização da estimativa da resistência com uso dos valores de maturidade do concreto com cura submersa + estufa utilizados na equação obtida.

Figura 26 - Estimativa da resistência à compressão no aplicativo.

14:23 37%

0

Intervalo de tempo (horas)

Resistência à Compressão (MPa)

Calcular Maturidade

Resultado

Maturidade: 16614.11°C-Horas | Resistência: 19.8 MPa

Histórico de valores de maturidade e resistência

Maturidade: 457.84°C-Horas | Resistência: 3.37 MPa

Maturidade: 1336.18°C-Horas | Resistência: 8.3 MPa

Maturidade: 2911.68°C-Horas | Resistência: 10.7 MPa

Maturidade: 5736.42°C-Horas | Resistência: 13.53 MPa

Maturidade: 11401.59°C-Horas | Resistência: 18.75 MPa

Maturidade: 16614.11°C-Horas | Resistência: 19.8 MPa

Obter Equação

Equação

Resistência (MPa) = $-25.23 + 10.61 \cdot \log(\text{Maturidade})$

Coefficiente de Determinação (r^2): 0.98

Estimar a Resistência

Estime a resistência à compressão com uso do valor da maturidade

Insira a maturidade (°C-Horas)

Estimar a resistência à compressão

Resistência:

Resistência à Compressão: 19.65 MPa Maturidade: 17015.01

Histórico de Valores de Resistência Estimada:

Resistência à Compressão: 3.46 MPa Maturidade: 505.71

Resistência à Compressão: 8.81 MPa Maturidade: 1616.82

Resistência à Compressão: 12.12 MPa Maturidade: 3315.11

Resistência à Compressão: 14.96 MPa Maturidade: 6140.56

Resistência à Compressão: 17.97 MPa Maturidade: 11808.42

Resistência à Compressão: 19.65 MPa Maturidade: 17015.01

Fonte: Autor.

Os valores obtidos da resistência à compressão são idênticos aos anteriores calculados em planilha eletrônica.

5. CONCLUSÕES

Após a realização do trabalho, foi possível observar que o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto segue uma curva logarítmica, e para ambos os conjuntos de corpos de prova que tem cura realizada de forma diferentes os valores obtidos têm um desenvolvimento sequencial, visto que o coeficiente de determinação das curvas logarítmicas teve mais de 90% de assertividade.

Foi possível perceber que a temperatura tem um grande efeito no desenvolvimento da resistência do concreto, quanto maior a temperatura mais as reações de hidratação ocorrem, para os dias 1, 3 e 7 a resistência à compressão do concreto que teve temperaturas elevadas durante o processo de cura foi maior. A resistência teve sua inversão a partir do 14º dia, onde o concreto que teve temperaturas de curas maior acabou desenvolvendo menos a resistência ao longo do tempo.

O aplicativo desenvolvido supre as necessidades de cálculo da maturidade e estimativa da resistência à compressão, considerando as limitações impostas, visto que a equação para calcular a maturidade escolhida foi a do fator tempo-temperatura. Por se tratar de um aplicativo para dispositivos móveis este pode receber atualizações com novas funcionalidades a fim de facilitar e melhorar a interação com o usuário e agregar novas funções.

Os valores estimados com uso do aplicativo são aceitáveis principalmente devido ao coeficiente de determinação das equações terem uma grande porcentagem de adequação aos dados.

Com base nestas informações, o método da maturidade com uso da equação do fator tempo-temperatura se mostra uma opção simples e viável para determinação da resistência à compressão do concreto, de fato possibilita um acompanhamento da resistência em tempo real se utilizado com equipamentos que transmitam os dados de forma remota. Já o aplicativo desenvolvido cumpre com o objetivo geral proposto no começo deste trabalho, e pode ser utilizado para obter a equação da curva do concreto e estimar a resistência à compressão.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de auxiliar no avanço de pesquisas futuras relacionadas ao estudo proposto neste trabalho, uma vez que certas questões não puderam ser avaliadas por completo, apresentam-se sugestões para dar continuidade ao tema do método da maturidade.

a) Cálculo da maturidade pelo método da idade equivalente, que envolve a energia de ativação do cimento utilizado nos cálculos;

b) Uso de dataloggers que transmitam em tempo real os dados de forma remota, possibilitando o cálculo da maturidade em qualquer momento, ou o uso de instrumentos de maturidade, estes já apresentam os valores de maturidade;

c) Automatização dos cálculos no aplicativo, com uso de instrumentos de medição de temperatura ou maturidade que tem contato remoto com o aplicativo, possibilitando assim um acompanhamento em tempo real da resistência à compressão;

d) Desenvolvimento do aplicativo para outros dispositivos além do Android, como para o sistema iOS presente em aparelhos da Apple ou para dispositivos desktop que fazem uso de sistemas operacionais como o Linux e Windows;

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira das Empresas de Fôrmas, Escoramentos e Acesso (ABRASFE). **Método da Maturidade do Concreto**.
- Almeida, I. R. ,1990, **Betões de alta resistência e durabilidade. Composição e características**, Tese de Doutorado, Instituto Superior Técnico da Universidade técnica de Lisboa, Portugal, 740pp.
- ALMEIDA, L. C. **Concreto**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002, p. 03.
- ANDOLFATO, R. P. **Controle Tecnológico Básico do Concreto**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2002, p. 02-03.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM C 1074-11: standard practice for estimating concrete strength by the maturity method**. Annual book of ASTM standarts. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 2011. v. 04.02.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. (BT-106).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico**. Rio de Janeiro, 2018.+
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222 Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779 Argamassa e concreto endurecidos Absorção de Água por Capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1 Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655, Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889, Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916, Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054, Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

ATKINS, P. W.. **Physical Chemistry.** Oxford University Press, New York, 1998

AZEVEDO, Â.A. - **Proposta para simplificação de ensaios destrutivos e não destrutivos para o monitoramento de ganho de resistência de pavimentos de concreto para fast-track.** 2008. 254 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, RS, 2008.

BRANCO, C. P.; PIERETTI, R. A. **Avaliação do concreto curado entre -5°C e 0°C.** 2012. Monografia (Graduação) – Curso de Tecnologia em Concreto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

Bungey, J. H., 1989, **The Testing of Concrete in Structures**, 2 ed., London, Surrey University Press.

Câmara, E. **“Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos”**, Florianópolis, 2006.

Carino, N. J. and Tank, R.C., 1992, **“Maturity function for concretes made with various cements and admixtures”**, ACI Journal , Mar/Apr., pp. 188-198

CARINO, N. J.; LEW, H.S. **The Maturity Method: From Theory to Application.** Reprinted from the Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, 2001.

CARVALHO, A. G. **Energia de ativação dos concretos: experimentação e modelagem.** Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação para mestre em Ciências em Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2002 Coutinho, A.S. e Gonçalves, A. ,1994, **Fabrico e Propriedades do Betão**, Vol.III LNEC, Lisboa, Portugal, 368p.

CECCONELLO, V.; TUTIKIAN B. **A influência das baixas temperaturas na evolução das resistências do concreto.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Vol.5 nº 1. São Paulo, Fev. 2012.

COSTA E SILVA, A. J.; BARBOSA, F. R.; MOTA, J. M. F.; VIEIRA FILHO, J. O. **Influência da temperatura na evolução da resistência à compressão do cimento Portland.** Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. Pernambuco, 2009.

DA SILVA, Julierme Siriano; D'OLIVEIRA, Maria Carolina de P. E.; SCHMITT, Evandro; FAGUNDES, Fabiano. **Viabilidade da aplicação do método da maturidade no monitoramento da resistência de concretos em regiões de clima tropical**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 10 n. 2 (Agosto, 2018): TECNOLOGIA & INFORMAÇÃO - ISSN 2176-7270.

FUSCO, Péricles Brasiliense; ONISHI, Minoru. **Introdução à engenharia de estruturas de concreto**. São Paulo: Cengage, 2017

FREIELEBEN-HANSEN, P. e PEDERSEN, E. J. **Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete**. *Nordisk Betong*. Vol. 1, pp. 21-25, 1977.

Ghasemi, Y. **Aggregates in Concrete Mix Design**. *Division of Structural and Fire*. Engineering Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering Luleå University of Technology SE-97187 Luleå, Sweden, 2017.

GIATEC. **Concrete Maturity From Theory to Application**. Giatec Scientific Inc, 2018. HELENE, Paulo. ANDRADE, Tibério. **Concreto de Cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: Ibracon, 2007. V2, Cap. 27, p. 905 -944.

Hulshizer, A.J., 2001, "**Benefits of the maturity method for cold-weather concreting**", *Concrete International*, March, pp.68-72

Kim, J. K.; Han, S. H.; Song, Y. C.; **Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I**. Experimental results. USA: Elsevier, 2002.

LIMA, Caio Ivson Vasconcelos et al. **Concreto e suas inovações**. Maceió: Cadernos de graduação, 2014.

MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on nondestructive testing of concrete** (2nd ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida (2004), pp. 101–146

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MARTIN, Juan Fernando Matias. **Aditivos para Concreto**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: Editora Ibracon, 2005. V1. Cap. 13, p. 381-406.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. - **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 f.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994, p. 01-02.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete** 2. ed. Prentice Hall: Pearson Education, 2003. 664 p

- MOTTER, D.C.; **Fiscalização de Obras Públicas – Proposta de Check List e Recomendações para o controle Tecnológico do Concreto em Obras Públicas.** Curitiba/PR – 2010.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto** / A. M. Neville; tradução: Ruy Alberto Cremonini. – 5. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** São Paulo: PINI, 1997, p. 220.
- NEVILLE, A.M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** Tradução de Ruy Alberto Cremonini. Porto Alegre: Bookman, 2013
- Oluokun, F. A. et al. , 1990, “**Early age concrete strength prediction by maturity – another look**”, ACI Materials Journal , November-December, pp. 565-572.
- Parsons, T. J., and Naik, T. R., 1984, “**Early Age Concrete Strength Determination by Pullout Testing and Maturity**”, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete , Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp. 177-199.
- PERES, L. D. P. **Avaliação de propriedades mecânicas de peças pré-moldadas submetidas à cura térmica pelo Método da Maturidade: estudo de caso.** Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira Júlio de Mesquita Filho. Dissertação mestrado em Engenharia Mecânica. Ilha Solteira – SP, 2006.
- PERES, L. D. P.; BARBOSA, M. P.; PINTO, R. C. A.. "**Determinação da Energia de Ativação para Cimentos Nacionais Aplicando o Procedimento ASTM C 1074-98**". 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Vitória - ES, 2003.
- PERES, L. D. P., BARBOSA, M. P., PINTO, R. C. A. **Aplicação do Método da Maturidade na avaliação da resistência à compressão de peças pré-moldadas.** 1º Encontro Nacional de pesquisa-projeto-produção em concreto pré-moldado. São Carlos. Novembro/2005.
- PEREIRA, J.P.V.V. - **Avaliação da resistência à compressão do betão através de ensaios não-destrutivos.** Coimbra, 1999. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 1999.
- PETRUCCI, E. G. R., 1998, “**Concreto de cimento Portland**”. Ed. Globo, São Paulo.
- Pinto, R.C.A. , 1997, “**The effect of curing temperatures on the development of mechanical properties of fresh and hardened high strength sílica fume mixtures – a maturity approach**”, Tese de Doutorado, Universidade de Cornell, Estados Unidos, 294pp.
- PINTO, R. C. A., e Hover, K. C., 2000. **Aplicação do Método da Maturidade para Avaliação do Tempo de Pega do Concreto.** XXIX Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Punta Del Este, Uruguai.

RHEINHEIMER, V. **Utilização de ensaios não destrutivos no controle tecnológico de execução de pavimentos de concreto tipo Fast Track.** Florianópolis, 2007. 266 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

SALVADOR FILHO, José A. Alves. **Cura térmica dos concretos de alto desempenho: Análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade.** Ilha Solteira: 2001.

SUBRAMANIAM, K. V., MOHSEN, J. P., SHAW, C. K., SHAH, S. P. , Ultrasonic Technique for Monitoring Concrete Strength Gain at Early Age, **ACI Materials Journal**, p. 458-462., 2002.

VERBECK, G. J.; HELMUTH, R. H. **Structure and physical properties of cement paste.** In: International Symposium on the Chemistry of Cement, 5. 1968, Tokyo. Proceedings. Tokyo, 1968.

APÊNDICES

APÊNDICE A – VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DESVIO PADRÃO.

Somente Submerso			
Idade (Dias)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão Média (MPa)	Desvio Padrão dos valores para a média
1	3,2	3,37	0,17
	3,3		
	3,6		
3	9,3	8,30	0,75
	7,5		
	8,1		
7	9,6	10,70	0,90
	10,7		
	11,8		
14	13,7	13,53	0,62
	12,7		
	14,2		
28	18,6	18,75	0,15
	18,9		
	15,8*		
42	17,6	19,80	2,20
	14,1**		
	22		

*Valor Desconsiderado para cálculo da média.

**Valor Desconsiderado para cálculo da média.

Submerso + Estufa			
Idade (Dias)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão Média (MPa)	Desvio Padrão dos valores para a média
1	4,3	4,13	0,12
	4		
	4,1		
3	8,8	9,37	0,42
	9,5		
	9,8		
7	12,1	12,23	0,82
	11,3		
	13,3		
14	13,8	13,43	0,59
	13,9		
	12,6		
28	9*	14,60	1,10
	15,7		
	13,5		
42	21	20,53	1,27
	21,8		
	18,8		

*Valor Desconsiderado para cálculo da média.

APÊNDICE B – VALORES UTILIZADOS PARA CALCULAR A MATURIDADE.

Submerso				
Dias	Maturidade (°C-Horas)	Ta (°C)	T0 (°C)	Deltat (Horas)
1	457,83	18,88	0,00	24,25
3	1336,32	18,43	0,00	72,50
7	2911,38	17,28	0,00	168,50
14	5736,53	17,06	0,00	336,25
28	11404,24	17,03	0,00	669,50
42	16610,78	16,47	0,00	1008,75

Submerso + Estufa				
Dias	Maturidade (°C-Horas)	Ta (°C)	T0 (°C)	Deltat (Horas)
1	505,71	20,85	0,00	24,25
3	1616,82	22,30	0,00	72,50
7	3315,11	19,67	0,00	168,50
14	6140,56	18,26	0,00	336,25
28	11808,42	17,64	0,00	669,50
42	17015,01	16,87	0,00	1008,75

**APÊNDICE C – VALORES DE MATURIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
UTILIZADOS PARA GERAR O GRÁFICO.**

Submerso	
Maturidade (°C-Horas)	Resistência (MPa)
457,83	3,37
1336,32	8,30
2911,38	10,70
5736,53	13,53
11404,24	18,75
16610,78	19,80

Submerso + Estufa	
Maturidade (°C- Horas)	Resistência (MPa)
505,71	4,13
1616,82	9,37
3315,11	12,23
6140,56	13,43
11808,42	14,60
17015,01	20,53

APÊNDICE D – VALORES DOS RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES.

Submerso				
Resistência Real	Maturidade (°C-Horas)	Resistência Estimada	Diferença (%)	Resíduos
3,37	457,83	3,00	-11,01	0,37
8,30	1336,32	7,93	-4,43	0,37
10,70	2911,38	11,52	7,66	-0,82
13,53	5736,53	14,65	8,22	-1,11
18,75	11404,24	17,81	-5,01	0,94
19,80	16610,78	19,54	-1,29	0,26

Submerso + Estufa				
Resistência Real	Maturidade (°C-Horas)	Resistência Estimada	Diferença (%)	Resíduos
4,13	505,71	4,21	1,80	-0,07
9,37	1616,82	8,88	-5,21	0,49
12,23	3315,11	11,76	-3,83	0,47
13,43	6140,56	14,24	6,02	-0,81
14,60	11808,42	16,87	15,54	-2,27
20,53	17015,01	18,34	-10,69	2,20