



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL - FECIV



WELINGTON HILÁRIO VIEIRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM VARIAÇÃO
DE TEMPERATURA

UBERLÂNDIA - MG

2018

WELINGTON HILÁRIO VIEIRA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM
VARIAÇÃO DE TEMPERATURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera.

UBERLÂNDIA - MG

2018

WELINGTON HILÁRIO VIEIRA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM
VARIAÇÃO DE TEMPERATURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para
a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera
Orientador

Aluno: Welington Hilário Vieira
Orientando

UBERLÂNDIA - MG

2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,

Dijair e Maria

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me deu força e inspiração para seguir em frente, me guiou e me protegeu nos momentos difíceis.

Aos meus pais, por serem exemplo, pelo apoio pessoal, financeiro e moral, no decorrer de toda a vida e pela dose diária de força e carinho.

A minha irmã e ao meu sobrinho pela amizade, as recepções, viagens e os momentos de descontração.

Ao professor Rodrigo Gustavo Delalibera, pelos ensinamentos, críticas, ideias, apoio e orientação neste trabalho.

Ao colega Vítor Gonçalves, aluno de mestrado da Pós-graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, pela ajuda com o programa usado e as dicas que foram de grande valor.

Aos meus amigos, de dentro e de fora do mundo da Engenharia, por deixarem esta caminhada mais leve. E por saberem compreender meus momentos de ausência recentes.

À empresa Matenge Gerenciamento e Construções e seu diretor presidente pelo conhecimento e experiência transmitidos.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, por me proporcionarem oportunidades únicas na minha vida acadêmica.

RESUMO

O concreto é caracterizado por sofrer variações de propriedades mecânicas e térmicas com a mudança de temperatura. As reações químicas que causam seu endurecimento e ganho de resistência são exotérmicas e causam elevação de sua temperatura. As estruturas de concreto com grandes dimensões podem apresentar fissuras por consequência do calor gerado durante a hidratação. Buscando entender melhor os efeitos da temperatura em uma estrutura com peças de grande volume de concreto foi modelado pelo método dos elementos finitos, a fase de hidratação de cada elemento estrutural de um *bunker*, usado para proteção de um acelerador linear (aparelho utilizado em tratamentos radioterápicos pela medicina). As análises realizadas confirmam o risco de fissuras em peças de maiores volumes. No caso específico, considerando condições favoráveis à não ocorrência de problemas, concluiu-se que ainda assim surgirão fissuras no concreto, estando o maior risco na parede, seguido pela laje. Outra conclusão que se tira é que quando se constrói uma estrutura de concreto com volume considerável ligada rigidamente a uma outra já endurecida, esta mais antiga sofre tensões de tração de altas intensidades, causadas pela geração de calor do novo elemento, podendo apresentar falhas. Destaca-se ainda que foram feitas algumas simplificações no modelo sendo possível refiná-lo para a obtenção de resultados mais precisos.

Palavras-chave: Concreto, Temperatura, Calor de Hidratação, Elementos Finitos, Acelerador Linear.

ABSTRACT

Concrete is characterized by varying mechanical and thermal properties with temperature changes. The chemical reactions that cause the hardening and resistance gain are exothermic and cause their temperature to rise. Concrete structures with a large proportion may present cracks caused by heat during a hydration. In order to better understand the effects of the temperature in a structure with concrete pieces of great thickness, was constructed by the finite element method the hydration phase of each structural element of a bunker used to protect a linear accelerator, an apparatus used in radiotherapy treatments by medicine . The analyzes confirm the risk of cracks in thicker pieces. In the specific case, considering conditions favorable to the non-occurrence of problems, it was concluded that there will still be cracks in the concrete with the highest risk in the wall, followed by the slab. Another conclusion that is drawn is that when a new concrete structure of considerable volume is rigidly attached to another one already hardened, the older one undergoes high tensions caused by the generation of heat of the new element being able to fail. Finally, some simplifications were made in the model and it is possible to refine it to obtain more precise results.

Keywords: Concrete, Temperature, Heat of Hydration, Finite Elements, Linear Accelerator

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.....	23
Figura 2 – Consumo de água em função da temperatura	37
Figura 3 – Perda de trabalhabilidade no tempo.....	37
Figura 4 – Variação da temperatura do concreto com uso de água e gelo	40
Figura 5 – Taxa de geração de calor no tempo.....	41
Figura 6 – Geração de calor em função da temperatura inicial do concreto	43
Figura 7 – Planta de forma das paredes	63
Figura 8 – Corte AA.....	63
Figura 9 – Corte BB.....	64
Figura 10 – Modelagem 3D dividida composta pela união de diversos sólidos	65
Figura 11 – Malha usada na modelagem	66
Figura 12 – Corte para restrição de análise de resultados	67
Figura 13 – Resultados de Azenha (2009).....	69
Figura 14 – Resultados obtidos no ANSYS.....	69
Figura 15 - Taxa de geração de calor do CEM IV 32.5 N.....	70
Figura 16 – Curva de taxa de geração de calor obtida para 20°C.....	70
Figura 17 – Curva de taxa de geração de calor de entrada no ANSYS	71
Figura 18 – Temperaturas máximas observadas em cada elemento em °C.....	77
Figura 19 – Temperatura ao longo do tempo nos diferentes elementos construtivos ..	78
Figura 20 – Diferença de temperatura entre 2 pontos escolhidos em cada elemento construtivo.....	80
Figura 21 – Migração da temperatura máxima do radier para o solo	80
Figura 22 – Migração da temperatura máxima da laje em direção à parede	81
Figura 23 – Migração da temperatura máxima da viga em direção à laje	81

Figura 24 – Tensões principais de compressão (a) e tração (b) no radier aos 3 dias em MPa.....	82
Figura 25 – Tensões principais de compressão (a) e tração (b) nas paredes aos 3 dias em MPa.....	82
Figura 26 – Tensões principais de compressão (a) e tração (b) na laje aos 3 dias em MPa.....	83
Figura 27 – Tensões principais de compressão (a) e tração (b) na viga aos 3 dias em MPa.....	83
Figura 28 – Máximas tensões principais de compressão em cada elemento construtivo	84
Figura 29 – Máximas deformações principais de compressão em cada elemento construtivo.....	84
Figura 30 – Máximas tensões principais de tração em cada elemento construtivo...	85
Figura 31 – Máximas deformações principais de tração em cada elemento construtivo	86
Figura 32 – Razão entre a máxima tensão de compressão no concreto endurecido e a peça fresca.....	86
Figura 33 – Razão entre a máxima tensão de tração no concreto endurecido e a peça fresca	87
Figura 34 – Porcentagem de uso da resistência a compressão do concreto no elemento fresco.....	87
Figura 35 – Porcentagem de uso da resistência a tração do concreto no elemento fresco	88
Figura 36 – Porcentagem de uso da resistência a compressão do concreto endurecido	89
Figura 37 – Porcentagem de uso da resistência a tração do concreto endurecido ...	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Compostos presentes no cimento	16
Tabela 2 – Composição dos principais tipos de cimento Portland	18
Tabela 3 – Temperaturas recomendadas para o concreto.....	38
Tabela 4 – Calor de hidratação dos componentes do cimento em (cal/g).....	42
Tabela 5 – Condutividade térmica dos principais compenêtres do concreto.....	47
Tabela 6 – Condutividade térmica dos principais compenêtres do concreto.....	49
Tabela 7 – Propriedades mecânicas para entrada no ANSYS de acordo com a idade do concreto	75
Tabela 8 – Temperaturas máximas e instantes de ocorrência	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Concreto	13
2.1.1	Cimento Portland.....	15
2.1.2	Agregados	18
2.1.3	Água e aditivos	19
2.1.4	Concreto no estado fresco	20
2.1.5	Concreto endurecido	22
2.1.6	Propriedades mecânicas	22
2.2	Propriedade térmica dos materiais	27
2.2.1	O calor específico.....	28
2.2.2	Dilatação térmica.....	29
2.2.3	Tensão térmica.....	30
2.2.4	Transferência de calor.....	31
2.3	Relações entre concreto e temperatura.....	36
2.3.1	Produção do concreto e trabalhabilidade	36
2.3.2	Influência do ambiente na cura	38
2.3.3	Calor de hidratação	41
2.3.4	Retração	45
2.3.5	Fluência.....	46
2.3.6	Propriedades térmicas do concreto	47
2.3.7	Resistência Mecânica do concreto endurecido	52

2.4	Método dos elementos finitos	55
2.4.1	Aplicação	56
2.4.2	MEF aplicado a análise térmica.....	57
2.4.3	MEF aplicado a análise de estruturas	58
3	ANÁLISE DE CASO	60
3.1	Análises realizadas.....	60
3.1.1	Acelerador linear	61
3.2	Características da estrutura analisada	62
3.3	Análises numéricas.....	64
3.3.1	Modelo Construído	64
3.4	Efeitos do calor de hidratação na estrutura	66
3.4.1	Análise térmica.....	67
3.4.2	Análise estrutural.....	73
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	76
4.1	Efeitos do calor de hidratação na estrutura	76
4.1.1	Análise térmica.....	76
4.1.2	Análise estrutural.....	81
5	CONCLUSÃO	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	ANEXO A – Forma, cortes detalhes e locação de estacas da estrutura analisada ...	96
	ANEXO B – Valores de entrada no ANSYS para as curvas tensão-deformação para diferentes idades e temperaturas	100

1 INTRODUÇÃO

O concreto e a temperatura estão intimamente ligados. O concreto de cimento Portland, assim como a maioria dos materiais de aplicação prática na construção civil, é caracterizado por sofrer variações de propriedades mecânicas e térmicas com a mudança de temperatura (CALLISTER, 2008). Além disso as reações químicas que causam seu endurecimento e ganho de resistência são exotérmicas podendo elevar sua temperatura a valores consideráveis.

O concreto pode trocar calor com o ambiente externo por convecção, radiação e condução. As diferentes formas e intensidades que se dão estas trocas de calor juntamente com a geração de calor interno definem o valor da temperatura em cada ponto do concreto ao longo do tempo (AZENHA, 2009). Em geral a temperatura não é uniforme em todo o elemento. Dessa forma a dilatação térmica ocorre de maneira diferente em cada ponto gerando tensões. As tensões surgem também quando a dilatação é impedida pelas condições de contorno.

As estruturas de concreto com grandes dimensões estão mais propensas a apresentarem fissuras nas primeiras idades por consequência do calor gerado durante a hidratação. Isso ocorre pois a diferença de temperaturas entre o interior e a parte externa se tornam consideráveis devido à perda de calor pelas superfícies para o ambiente. O resultado disso é a formação de fissuras, que dependendo do caso pode afetar a capacidade de uso da estrutura ou até mesmo a segurança de seus usuários (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Para avaliar os efeitos da temperatura em uma estrutura com peças de grande volume foi modelado pelo método dos elementos finitos um *bunker* usado para proteção de um equipamento que emite radiação, tendo como carga o calor de hidratação. Tal estrutura se mostrou interessante para este estudo por ser feita toda em concreto, tanto infra quanto superestrutura. Além disso apresentava elementos com espessuras variando de 45 cm até 240 cm, sendo possível coletar várias informações diferentes sobre variações de temperatura e suas consequências.

1.1 Justificativa

Como, em geral, os problemas térmicos durante a hidratação se mostram mais importantes em concretagens de grandes volumes, significa que um problema que

inviabilize o uso da estrutura causará um ônus considerável. Dessa forma o projeto e execução mais adequados, podem evitar problemas e até mesmo reduzir os custos.

No caso da estrutura específica, uma modelagem dela é importante pois os resultados da análise podem ser usados para prever e evitar que ocorram fissuras em estruturas semelhantes. Em geral o projeto é padrão e costuma ser replicado quando se constrói novas unidades de tratamento, de modo que um estudo mais aprofundado da estrutura pode ocasionar grande economia ao longo do tempo. Destaca-se ainda que a perda de capacidade de blindagem desta estrutura leva a sérios prejuízos à saúde das pessoas que vivem perto dela, devendo ser evitada sempre.

1.2 Objetivos

Com base na determinação de tensões de origem térmica ao longo do tempo nas primeiras idades, o objetivo deste estudo é fornecer bases para auxiliar o engenheiro que for desenvolver o projeto deste tipo de estrutura. Facilitando desta forma suas decisões sobre a necessidade de reforços no concreto de cada elemento, tendo em vista o grau de risco de falha de natureza térmica que se tem.

Como forma de auxílio na fase construtiva, determinou-se também os maiores valores de temperaturas e seus instantes de ocorrência. Tais informações se mostram úteis para se decidir quando é conveniente reduzir a temperatura do concreto a ser lançado e quando a cura e as condições de proteção devem ser mais cuidadosas para evitar aumento de gradiente térmico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto

Os gregos e romanos, descobriram que as cinzas vulcânicas, se moídas finamente e misturadas com cal e água, produziam uma argamassa endurecida, que era resistente ao intemperismo. Este material foi usado na construção de importantes obras destas civilizações (NEWMAN; CHOO, 2003a). Há também evidências de uso de argamassa de gesso pelos egípcios em algumas pirâmides e uso de argila pelos assírios e babilônios como ligantes em suas obras (LI, 2011). O cimento Portland, o principal ligante usado na atualidade na construção civil, surgiu como uma evolução destes materiais. Ele favoreceu o surgimento do concreto armado como uma evolução natural dos materiais e técnicas para se construir estruturas.

O concreto armado tal como se conhece hoje nasceu em meados do século XIX. Historicamente datando do ano de 1855 na França, sendo marcado pela construção de um barco por Lambot, a primeira peça que se tem registro construída com essa técnica. Entre seus pioneiros, além de Lambot, destaca-se Monier, que era engenheiro, e Coignet, que era o encarregado dos jardins de Versailles, também franceses, e Hyatt um advogado norte-americano. A concepção de tal material foi possível graças a Revolução Industrial, que tornou aplicável em larga escala o cimento Portland e o aço laminado (FUSCO, 2008).

O concreto de cimento Portland é formado pela mistura de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e eventualmente outros componentes como microssílica, polímeros e aditivos destinados a melhorar alguma propriedade do material. As adições opcionais têm finalidades como aumentar a trabalhabilidade e a resistência ou retardar a velocidade das reações químicas que ocorrem no concreto.

O concreto armado é entendido como o concreto que possui barras de aço em seu interior, formando um material composto onde a ligação entre os materiais se dá pela aderência entre eles. A principal vantagem deste material é a melhora do aproveitamento da resistência mecânica do concreto, que é caracterizado por apresentar resistência a tensões de tração bem inferior às de compressão. Dessa forma as barras de aço são posicionadas de modo a absorver as tensões de tração, compensando esta inferioridade e possibilitando que se use melhor a resistência à compressão do concreto em casos de solicitações que provocam flexão no elemento estrutural.

O concreto armado se destaca de maneira positiva pela sua capacidade de se adaptar a qualquer forma, o consumo de aço ser otimizado através do uso apenas nas regiões de maior tensão, possibilidade de construir estruturas monolíticas, apresentar boa resistência a agressões físicas e químicas do ambiente, e ser um material de baixo custo. De maneira negativa se destaca seu peso próprio elevado, demolições e reformas onerosas, necessidade de fôrmas e escoramentos durante a construção e ineficiência como isolante térmico e acústico.

2.1.1 Cimento Portland

2.1.1.1 O cimento

O cimento Portland é um pó fino com propriedades que fazem com que ele se solidifique quando misturado com água ganhando grande resistência mecânica e mesmo sendo novamente submetido à ação da água, não se decompõe mais. De acordo com a Associação Brasileira do Cimento Portland-ABCP (2002), esse tipo de cimento foi criado e patenteado em 1824 por um construtor inglês, chamado Joseph Aspdin. Nesse período, era comum na Inglaterra construir com a pedra de Portland, uma ilha situada no sul do país. Como o produto desenvolvido por Aspdin se assemelhava na cor e na dureza a essa pedra de Portland, ele registrou esse nome em sua patente, e o produto tornou-se popular em todo o mundo e conhecido por cimento Portland.

O principal componente do cimento Portland é o clínquer, composto de calcário e a argila. Para sua fabricação, a rocha calcária é britada, moída e misturada com argila. Essa mistura é levada a um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. A alta temperatura transforma essa mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de grãos com diâmetro entre 5 e 25 mm (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Além do clínquer cuja função é desenvolver elevada resistência mecânica e durabilidade ao cimento, ele também conta com a adição de outros materiais para melhorias de propriedade do material e possibilitar a produção de cimentos adequados para diversos usos. As principais adições são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

O gesso controla a velocidade de endurecimento do concreto após o contato com a água. Sem ele o endurecimento é quase instantâneo, inviabilizando seu uso nas obras. Por isso, o gesso é uma adição indispensável. A quantidade adicionada é em geral, 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa (ABCP, 2002).

As escórias de alto-forno são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e possuem propriedade de ligante hidráulico desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. A adição de escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, apresenta melhoria de

algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final (ABCP, 2002).

Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas. Esses materiais quando pulverizados em partículas muito finas, também passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico desde que, além da água, exista um outro com o qual possa reagir. O clínquer é justamente um desses materiais, pois no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio composto com o qual a pozolana reage para obter ganho de resistência. O cimento assim obtido oferece a vantagem de conferir maior impermeabilidade, aos concretos (ABCP, 2002).

Os materiais carbonáticos são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição sendo conhecidos por filer calcário. Tal adição serve para tornar os concretos mais trabalháveis, pois funcionam como redutores de atrito entre os materiais devido a suas dimensões (ABCP, 2002).

2.1.1.2 Composição química

O calcário composto basicamente por cal (CaO) e a argila pela sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃), de acordo com Mehta e Monteiro (2006) reagem dentro do forno durante a produção do clínquer formando os compostos apresentados na Tabela 1 que são os principais componentes do cimento. A Tabela 1 apresenta também seus nomes e suas abreviações pelas quais geralmente são conhecidos.

Tabela 1 - Compostos presentes no cimento

Composto	Nome	Abreviação
3CaO·SiO ₂	Silicato tricálcico	C ₃ S
2CaO·SiO ₂	Silicato dicálcico	C ₂ S
3CaO·Al ₂ O ₃	Aluminato tricálcico	C ₃ A
4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	Ferroaluminato tetracálcico	C ₄ AF

Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

Segundo Mehta e Monteiro (2006) a composição do cimento não é exatamente o que é expresso por essas fórmulas porque nas altas temperaturas as impurezas tais como

magnésio, sódio, potássio e enxofre, presentes nos materiais, são capazes de se combinar com cada um destes compostos do cimento.

2.1.1.3 Tipos de cimentos comercializados

Os cimentos são padronizados para comercialização através da divisão em vários tipos, geralmente com base na quantidade e o tipo de adição que o clínquer recebe. No Brasil o cimento é dividido em 5 tipos principais sendo cada um deles normalizado por norma brasileira específica produzida pela Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. São classificados em cimento portland comum, composto, de alto-forno, pozolânico e de alta resistência inicial. O cimento pode ser classificado também como resistente aos sulfatos (RS) e de baixo calor de hidratação (BC). Podendo essas duas últimas serem aplicadas a qualquer um dos tipos anteriores desde que tenha quantidades específicas de adições que garantam que apresentem tais características.

Os principais tipos de cimentos podem ser observados na Tabela 2. O cimento Portland comum CP I, é caracterizado por contar apenas com a adição do gesso necessário para o controle de pega ou uma pequena adição de material pozolânico (CP I-S). O cimento Portland composto, conta com a adição de uma pequena parcela de escória (CP II-E), pozolana (CP II-Z) ou filer (CP II-F). Os cimentos portland de alto-forno (CP III) e pozolânicos (CP IV) são compostos por quantidades consideráveis de escórias granuladas de alto-forno e materiais pozolânicos respectivamente, e apresentam como ponto positivo um menor consumo energético para sua produção. O cimento portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) pode ser compreendido como um tipo de cimento portland comum que desenvolve alta resistência inicial pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina dos grãos.

Tabela 2 – Composição dos principais tipos de cimento Portland

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Comum	CP I	100	-	-	-	NBR 5732
	CP I-S	99-95	-	1-5	-	
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

Fonte: ABCP (2002).

2.1.2 Agregados

Os agregados do concreto podem ser divididos em graúdos e miúdos, conforme sua composição granulométrica. O agregado miúdo é a areia natural quartzosa, ou a artificial, resultante do britamento de rochas estáveis, de diâmetro máximo igual ou inferior a 4,8 mm. Já o agregado graúdo é o pedregulho natural, ou a pedra britada proveniente do britamento de rochas estáveis com diâmetro máximo superior a este valor.

O agregado não entra em compostos químicos complexos na formação do concreto, sendo tratado como um elemento inerte. Mas muitas propriedades importantes do concreto dependem de características dos agregados. São elas porosidade, absorção de umidade, forma da superfície, textura, resistência a compressão, módulo de elasticidade, além da presença de substâncias deletérias. Estas características estão diretamente ligadas à composição mineralógica da rocha que originou o agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Os agregados são considerados de peso normal quando permitem a produção de concretos que pesam em torno de 2400 kg/m^3 . Agregados que pesam menos de 1120 kg/m^3 são geralmente considerados leves. Os agregados leves naturais são obtidos pelo esmagando de rochas vulcânicas ígneas como pedra pomes, escória ou tufo. Os sintéticos são fabricados por tratamento térmico de materiais como argilas, xisto, ardósia, diatomita, perlita, vermiculita, escória de alto forno e cinza volante. O concreto com uso destes materiais geralmente é mais poroso, sendo melhor isolante térmico e acústico que o convencional. Os agregados pesados permitem a produção de concretos com massa específica de 2900 a 6100 kg/m^3 e são usados principalmente para fazer escudos de radiação nuclear. As rochas naturais adequadas para uso como agregados pesados são compostas predominantemente de minérios de bário, de ferro e um de titânio (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

2.1.3 Água e aditivos

Uma mistura de concreto em proporção adequada possuirá a trabalhabilidade desejada para concreto fresco e exigida para desenvolver a durabilidade e resistência do concreto endurecido. A quantidade total de água no concreto e a relação água-cimento é um fator crítico na produção de concreto de boa qualidade. Pois a água em excesso reduz a resistência do concreto, enquanto em pouca quantidade torna a produção de concreto impraticável (LI, 2011).

Existe uma regra simples sobre a aceitabilidade da água de amassamento: se a água é potável é adequada. No caso de águas não-potáveis é necessário controlar o conteúdo de matéria orgânica, os resíduos sólidos existentes, bem como os teores de sulfatos (SO_4) e de cloretos (Cl^-). Os agentes agressivos contidos na água de amassamento, quando mantidos em baixa quantidade são neutralizados pelas

próprias reações de hidratação do cimento e, com isso, termina seu efeito destruidor (FUSCO, 2008).

Os aditivos variam amplamente na composição, desde tensoativos e sais solúveis até polímeros e minerais insolúveis. Geralmente, eles são usados em concreto para melhorar trabalhabilidade, acelerar ou retardar o tempo de pega, controlar o desenvolvimento da resistência, e aumentar a durabilidade sob ação de congelamento, fissuração térmica, ataque de sulfato e corrosão do reforço.

De acordo com Fusco (2008) um dado muito importante a ser considerado é o controle rigoroso da composição química de aditivos. Um composto químico particularmente perigoso para o concreto armado é constituído pelos cloretos, pois a reação química de corrosão das armaduras em presença do íon Cl^- é muito agressiva. Recomenda-se que seja proibida a aplicação no concreto armado de aditivos que contenham cloretos em suas composições.

2.1.4 Concreto no estado fresco

Para fabricar um concreto com determinada característica de desempenho, deve-se selecionar e definir a proporção adequada de cada material que irá compor o concreto. Seu traço deve garantir que o produto apresente a consistência, a trabalhabilidade e a homogeneidade necessárias para o lançamento eficiente sem problemas de concretagem, resistência e durabilidade. Concluída a concretagem, o concreto começa a repousar para que inicie seu endurecimento e atinja o ganho da resistência mecânica necessária para atender ao uso ao qual foi projetado.

O ganho de resistência do concreto começa poucas horas após sua produção. O período entre o início do endurecimento até ele atingir um valor de resistência tal que possa ser deformado é chamado de tempo de pega. É comum definir o início da pega como sendo o momento em que a consistência do concreto não permite mais a sua trabalhabilidade, dificultando as atividades de lançamento e adensamento. De acordo com a ABNT NBR 14931:2004 em condições normais de clima e considerando uso de concreto convencional, o intervalo de tempo transcorrido entre o instante em que a água de amassamento entra em contato com o cimento e o final da concretagem não deve ultrapassar 2h30min.

Após o início da pega, a hidratação do concreto se desenvolve com grande velocidade e nesse período a água existente na mistura começa a evaporar. Esta evaporação

pode comprometer as reações de hidratação do cimento, e fazer com que o concreto sofra uma diminuição de volume, conhecida por retração. Esse encolhimento é parcialmente impedido pelas fôrmas e armaduras, gerando tensões de tração que não podem ser resistidas pelo concreto, devido a sua pouca idade, causando fissuras que levam à diminuição da sua resistência final (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014).

Para evitar esse problema deve-se evitar a perda de umidade pelo concreto através do processo de cura. A cura consiste no fornecimento de água ou proteção do concreto de modo a evitar que sua umidade diminua. Usualmente, a cura consiste em molhar as superfícies aparentes do concreto, ou mesmo molhar constantemente as faces das fôrmas de madeira, evitando a secagem destas. Em elementos de superfícies como as lajes é usual a colocação de mantas que possam ser mantidas encharcadas. Para peças pré-moldadas, é comum a cura a vapor, onde se mantém o ambiente saturado e com temperatura controlada acelerando-se o ganho de resistência do concreto (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014).

Durante a hidratação o C₃S e o C₂S reagem com a água de amassamento para produzir um hidrato de silicato de cálcio amorfo em forma de gel conhecido pela fórmula reduzida C-S-H, o principal responsável pela resistência mecânica do concreto. O C₃A e o C₄AF dependem da presença de gesso para que a reação ocorra na velocidade adequada. Em um primeiro momento reagem com o gesso e a água formando uma estrutura chamada estringuíta. Quando se consome todo o gesso cessa a produção de estringuíta e esta passa a reagir com o C₃A e o C₄AF formando monossulfatos (NEWMAN; CHOO, 2003b).

De acordo com Newman e Choo (2003b) usando um microscópio eletrônico para observar o concreto, pede-se visualizar que se forma um gel de C-S-H ao redor dos grãos maiores de C₃S e C₂S e nos espaços entre os grãos se identifica a presença de hidróxido de cal hidratado Ca(OH)₂, monossulfatos e novamente C-S-H. A forma desses espaços é influenciada pela relação água-cimento, que por sua vez determina a porosidade da pasta e conseqüentemente o desenvolvimento da resistência.

As diversas reações químicas que se desenvolvem durante o processo de hidratação são de natureza exotérmica, liberando uma quantidade considerável de calor e conseqüentemente aumentando a temperatura do concreto. Essa característica merece grande atenção principalmente em obras com concretagens volumosas pois

nesses casos a variação volumétrica e o gradiente térmico podem conduzir ao aparecimento de fissuras durante o processo.

2.1.5 Concreto endurecido

Após o concreto estar endurecido, as principais características de interesse são as suas propriedades mecânicas, pela grande importância no projeto estrutural. Destaca-se as resistências à compressão e à tração. No estágio atual de desenvolvimento do cálculo de estruturas de concreto armado, considera-se de maneira razoável que a resistência do concreto para diversos tipos de solicitações seja função de sua resistência à compressão. A ABNT NBR 6118:2014, apresenta uma série de expressões a partir das quais se obtêm valores para diversos tipos de solicitações. Essas expressões são baseadas em dados experimentais.

2.1.6 Propriedades mecânicas

2.1.6.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão (f_{cj}) de um corpo de prova de concreto com idade de j dias é obtida por meio de ensaio de compressão axial. Seu valor é obtido pela equação (1) onde ocorre a divisão da força formal (N) responsável pela ruptura pela área (A) da seção transversal do elemento ensaiado.

$$f_{cj} = \frac{N}{A} \quad (1)$$

No Brasil são utilizados corpos de prova cilíndricos, com diâmetro da base de 15 cm e altura de 30 cm, e também corpos com base de 10 cm e altura de 20 cm. A moldagem dos cilindros é especificada pela ABNT NBR 5738:2015 e o ensaio deve ser feito de acordo com a ABNT NBR 5739:2007 para obter a resistência à compressão média. A resistência característica a compressão (f_{ck}), usada para a determinação das demais propriedades do concreto pode ser obtida com base no valor médio da resistência a compressão aos 28 dias (f_{cm}). A forma de se obter tal valor é apresentada na ABNT NBR 12655:2015 levando em conta o valor médio e desvio padrão do ensaio de vários corpos de prova.

A resistência característica varia com a idade de forma diferente para concretos feitos com uso de diferentes tipos de cimento. A Figura 1 apresenta a evolução da resistência à compressão para os principais cimentos comercializados no Brasil.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, a resistência característica em uma idade inferior aos 28 dias (f_{ckj}) pode ser calculada pela equação (2). Onde β_1 pode ser obtido em função do tipo de cimento usado pela equação (3).

$$f_{ck} = \beta_1 f_{ckj} \quad (2)$$

$$\beta_1 = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (3)$$

Onde:

$s=0,38$ para cimento CPIII e IV;

$s=0,25$ para cimento CPI e II;

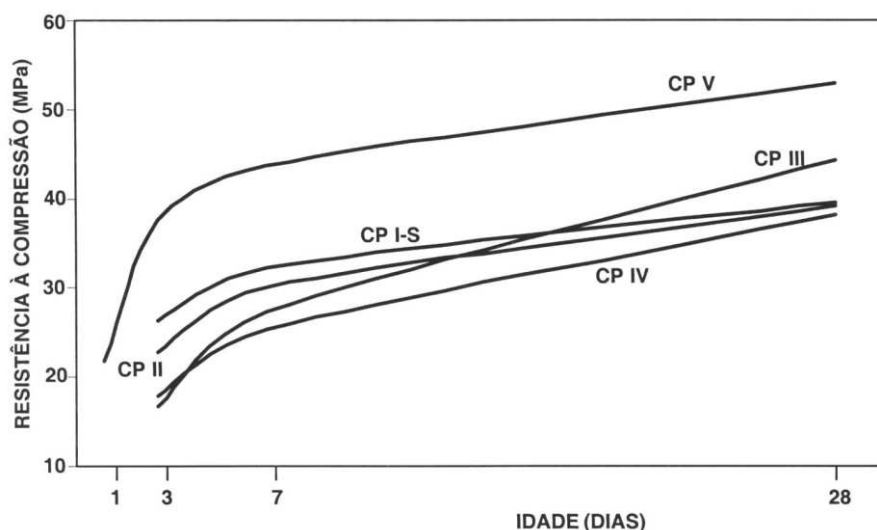
$s=0,20$ para cimento CPV ARI;

t : é a idade do concreto em dias.

No EUROCODE 2, o valor de β_1 é calculado de forma idêntica, inclusive com mesmos valores de s , onde a única mudança é a nomenclatura dos cimentos. Já o valor do f_{ckj} é obtido da equação (4) com $f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa.

$$f_{ckj} = \beta_1 f_{cm} - 8 \text{ MPa} \quad (4)$$

Figura 1- Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland



Fonte: ABCP (2002).

2.1.6.2 Resistência à tração

O concreto é um material que resiste mal à tração, sendo em alguns casos negligenciada. Mas essa capacidade resistente se torna importante em peças sujeitas

a esforço cortante e fissuração. A resistência a tração pode ser obtida de maneira direta pelos ensaios de flexão, compressão diametral e tração direta. Mas geralmente em fase de projeto é estimada por meio de equações que a relacionam com o f_{ck} .

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, na falta de ensaios para obtenção da resistência a tração direta e na flexão, pode-se usar seu valor médio ($f_{ct,m}$), que pode ser obtido pela equação (5) para concretos até a classe C50 de resistência. O valor característico é expresso em inferior e superior. Seu valor inferior ($f_{ctk,inf}$) (equação (6)) possui estatisticamente 5% de probabilidade da resistência da peça ser menor que a calculada. O seu valor superior ($f_{ctk,sup}$) (equação (7)) possui estatisticamente 5% de probabilidade da resistência ser maior que a obtida. Esse equacionamento é idêntico ao usando no EUROCODE 2.

$$f_{ct,m} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} \quad (5)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m} \quad (6)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3f_{ct,m} \quad (7)$$

Esse conjunto de equações pode ser usado para determinar a resistência a tração para idades menores que 28 dias desde que $f_{ck} \geq 7$ MPa.

2.1.6.3 Módulo de elasticidade

O concreto é um material multifásico e por essa razão seu módulo de elasticidade não é constante com a variação de tensões e deformações. Além disso seu valor está diretamente ligado ao módulo de elasticidade dos agregados, da pasta de cimento, suas frações volumétricas e composições além das condições de umidade relativa do ambiente (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Devido a sua variação, define-se três tipos módulos de elasticidade para o concreto com base na sua relação com a curva da tensão em função da deformação. O módulo tangente é variável em cada ponto e dado pela inclinação da reta tangente à curva nesse ponto. O módulo de deformação tangente na origem (E_{ci}) é dado pela inclinação da reta tangente à curva na origem. Por fim o módulo secante (E_{cs}) é variável em cada ponto e é obtido pela inclinação da reta que une a origem com esse ponto.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, o valor de E_{ci} do concreto pode ser estimado por meio da expressão (8) para concretos de classe de resistência até C50.

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (8)$$

Onde α_E depende do tipo de agregado tendo-se:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio;

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito.

O valor de E_{cs} é estimado na ABNT NBR 6118:2014 pela expressão (9) e no EUROCODE 2 pela expressão (10) com $f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa e correção do valor com base no tipo de agregado usando os mesmos valores de α_E apresentados anteriormente para agregados semelhantes a cada um deles.

$$E_{cs} = \left(0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80}\right) E_{ci} \leq E_{ci} \quad (9)$$

$$E_{cs} = 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (10)$$

A ABNT NBR 6118:2014 permite que, na análise do comportamento de um elemento estrutural, seja adotado módulo de elasticidade único, sendo igual ao módulo de deformação secante. Para tensões de compressão menores que $0,5 \cdot f_c$, permite-se ainda admitir uma relação linear entre tensões e deformações.

Para idade menor que 28 dias a ABNT NBR 6118:2014 permite calcular o módulo de elasticidade do concreto $E_{ci}(t)$ pela expressão (11) para concretos com f_{ck} de 20MPa a 45 MPa. No EUROCODE 2 o mesmo cálculo é dado pela expressão (12), com $f_{cm}(t)$ a resistência média a compressão na idade de interesse.

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \left(\frac{f_{ckj}}{f_c}\right)^{0,3} \quad (11)$$

$$E_{cs}(t) = E_{cs} \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}}\right)^{0,5} \quad (12)$$

Para análises no estado limite último de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 pode ser empregado o diagrama tensão-deformação ($\sigma \times \varepsilon_c$), que pode ser obtido pela equação (13) que representa o trecho parabólico da curva para concretos de classes até C50. Para valores de deformação maiores que ε_{c2} a tensão se torna constante até atingir a deformação última (ε_{cu}) que vale 3,5‰. Para o cálculo da resistência característica à compressão pode se substituir $0,85 f_{cd}$ por f_{ck} .

$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right] \quad (13)$$

Onde:

f_{cd} : resistência de cálculo a compressão

ε_{c2} : deformação específica de encurtamento no início do patamar plástico, que neste caso vale 2‰.

2.1.6.4 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson é, a razão entre a deformação lateral e a deformação axial resultante da aplicação de uma carga axial dentro do regime elástico. O coeficiente de Poisson pode ser desprezado na maioria dos projetos de concreto mas ganha importância na análise de estruturas estaticamente indeterminadas. Segundo Azenha (2009), após a concretagem é aceitável considerar que o coeficiente de Poisson é igual a 0,5, justificando que a deformação ocorre sem alterações volumétricas. De acordo com Mehta e Monteiro (2006) o coeficiente para o concreto endurecido varia entre 0,15 e 0,20, não sendo observada influência clara de relação água-cimento, tempo de cura e tamanho do agregado. Conclui-se então que ocorre uma evolução deste coeficiente de 0,5 a aproximadamente 0,2 durante o processo de endurecimento. Para o concreto fissurado o coeficiente é nulo.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, para tensões de compressão menores que 50% da resistência a compressão, e tensões de tração menores que f_{ct} , o coeficiente de Poisson (ν) pode ser tomado igual a 0,2.

2.1.6.5 Tipos de deformações

As formas de deformação do concreto podem ser divididas em elásticas, plásticas e dependentes do tempo e das condições climáticas. As elásticas são aquelas devidas

a carregamentos e temperaturas, que quando estes entes causadores são retirados elas desaparecem. As deformações plásticas são aquelas que não desaparecem com a retirada das cargas. As deformações dependentes do tempo são a retração, a expansão, e a fluência. Elas estão relacionadas com a variação volumétrica ou de umidade do gel do cimento presente no concreto.

A retração pode ser térmica e hidráulica. A térmica ocorre após a redução da temperatura do concreto que acontece após o fim de seu aquecimento devido a reação exotérmica de hidratação do cimento. A hidráulica ocorre quando o concreto é mantido em um ambiente não saturado perdendo parte da água livre e reduzindo o volume. De acordo com Roux (2009) a retração aumenta com a aumento do consumo de cimento e da relação água cimento e com a diminuição da umidade relativa do meio, espessura das peças e taxa de armadura.

A retração em uma peça de concreto armado é menor que em uma de concreto simples idêntica pois o aço restringe o deslocamento, contudo surge uma tensão de tração no concreto. A retração é de difícil previsão nas análises de estruturas complexas. O que se procura fazer é ter grandes cuidados na fase de execução com uso de fôrmas estanques, cura adequada, medidas para evitar retração diferencial e junta de dilatação em estruturas longas (ROUX, 2009).

A expansão do concreto é observada apenas em concretos submersos por um longo período. A fluência é o fenômeno no qual o concreto sob ação de um carregamento constante sofre aumento da deformação no tempo. Os principais fatores que aumentam a fluência do concreto são o aumento da carga, do consumo de cimento, da relação água cimento e do tempo e a diminuição da espessura da peça, da umidade relativa e da idade em que o concreto foi carregado (ROUX, 2009).

A retração do concreto e a deformação devida a fluência podem ser calculadas usando o Anexo A da ABNT NBR 6118:2014.

2.2 Propriedade térmica dos materiais

A temperatura é uma das grandezas fundamentais do SI (Sistema Internacional) e está relacionada às sensações de quente e frio. Do ponto de vista microscópico a temperatura de uma massa pode ser compreendida como a intensidade da vibração dos seus átomos e moléculas. Essa grandeza é medida na escala Kelvin, cuja unidade é o kelvin (K), que se inicia na temperatura de 0 K, chamada de zero absoluto que

representa um estado teórico onde os átomos estão em seu nível mais baixo de energia cinética. A escala não tem um limite superior.

A escala Kelvin é usada principalmente por cientistas. Sendo mais comum em quase todos os países do mundo no dia a dia, o uso da escala Celsius. As temperaturas na escala Celsius são medidas em graus, e um grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$) tem o mesmo valor numérico que um kelvin. Entretanto, o zero da escala Celsius está em um valor mais conveniente que o zero absoluto, representando o ponto de fusão da água. A relação entre a temperatura em Celsius (T_C) e kelvin (T) é dada pela equação (14).

$$T_C = T - 273,15^{\circ} \quad (14)$$

Outra escala usada é a Fahrenheit, comum nos Estados Unidos, mas pouco utilizada no Brasil, que utiliza um grau menor que o grau Celsius e um zero de temperatura diferente. A relação entre as temperaturas nas escalas Celsius e Fahrenheit é dada pela equação (15).

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^{\circ} \quad (15)$$

A variação de temperatura se deve a uma variação da energia térmica do sistema causada pela troca de energia com o ambiente. Esta energia é chamada de calor e sua unidade no SI é o joule (J), mas é comum sua expressão em outras unidades como calorias (cal) ou British thermal units (Btu). Entre essas unidades, existem as seguintes relações:

$$1 \text{ cal} = 3,968 \times 10^{-3} \text{ Btu} = 4,1868 \text{ J.}$$

2.2.1 O calor específico

O calor específico é definido como a energia necessária para aumentar a temperatura em um grau de uma unidade de massa de uma dada substância. Sua unidade no SI é o $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$. O calor específico de uma dada substância depende, em geral, da temperatura e da pressão. De acordo com Çengel (2009), sólidos e líquidos podem ser considerados como substâncias incompressíveis, e nesse caso o calor específico depende apenas da temperatura. O calor específico aumenta com a temperatura até certo ponto que se torna constante. De acordo com Callister (2008) geralmente este ponto está abaixo da temperatura ambiente para boa parte dos sólidos.

A energia térmica (Q) necessária para causar uma determinada variação de temperatura (ΔT) é dada em função do calor específico e da massa (m) do material pela equação (16). Os valores de calor específico (c) podem ser facilmente obtidos para temperaturas em torno da ambiente em tabelas disponíveis em Halliday, Resnick e Walker (2016), Callister (2008) e Çergel (2009) para diversos materiais úteis nas aplicações práticas do dia-a-dia.

$$Q = mc \Delta T \quad (16)$$

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, devido a conservação de energia, com base na equação (16) é possível determinar a temperatura de equilíbrio de um sistema com dois ou mais corpos. Para isso basta conhecer a massa, o calor específico e a temperatura inicial de cada um deles e considerar que a variação de energia é nula, como expressa a equação (17) para um número n de corpos diferentes.

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (17)$$

2.2.2 Dilatação térmica

Quando ocorre o aumento da temperatura aumenta a energia cinética dos átomos e eles tendem a ficar mais afastados uns dos outros. Com isso na maioria dos materiais sólidos as dimensões aumentam com o aumento da temperatura e contraem com a sua diminuição, fenômeno conhecido por dilatação térmica. A variação no comprimento linear de um sólido (Δl) causada pela dilatação térmica está relacionada com a variação de temperatura, seu comprimento inicial (l_0) e o coeficiente de dilatação linear (α) pela equação (18).

$$\Delta l = L_0 \alpha \Delta T \quad (18)$$

O coeficiente de dilatação térmica volumétrico (β) para materiais isotrópicos pode ser deduzido partindo da ideia da ocorrência de deformação linear em todas as direções do objeto e pode ser aproximado com pequeno erro por $3 \cdot \alpha$. Dessa forma a variação volumétrica (ΔV) para um corpo de volume (V_0) é obtida pela equação (19).

$$\Delta V = V_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (19)$$

O valor de α varia de material para material, é obtido experimentalmente e sua unidade é o inverso da temperatura podendo ser expressa em $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ou K^{-1} . De acordo com

Callister (2008), de maneira geral a dilatação térmica é menor nos materiais cerâmicos, intermediária nos metais e maior nos polímeros. O que ocorre é que quanto maior a energia de ligação atômica, menor será a separação dos átomos e menor o valor de α . Com o aumento da temperatura ocorre também o aumento do coeficiente de dilatação térmica.

As cerâmicas são marcadas por forte ligação atômica, e excluído as cerâmicas não cristalinas e as de estrutura cristalina cúbica, as demais tem comportamento anisotrópico ocorrendo em alguns casos inclusive contração em alguma direção durante o aumento de temperatura. Por serem materiais frágeis, a principal preocupação em relação ao seu uso é que se o coeficiente de dilatação for alto podem ocorrer fissuras devidas a variações dimensionais não uniformes. Em relação aos metais a preocupação é com a produção de ligas com baixa dilatação para uso em equipamentos em que a variação dimensional não é desejável (CALLISTER, 2008).

Na vida prática a dilatação térmica possibilita por exemplo a construção de termômetros que se baseiam no fato de que líquidos como o mercúrio e o álcool se dilatam mais do que os tubos de vidro que os contêm. Também deve ser levada em conta em casos como a definição de juntas de dilatação em projetos de prédios e pontes, para permitir que o concreto possa se expandir nos dias quentes sem que a construção se deforme ou surjam tensões inesperadas ou desnecessárias.

A diferença ou proximidade dos valores de dilatação dos diferentes materiais também possibilitam aplicações práticas. As chapas bimetálicas, que são formadas pela união de dois metais com coeficientes de dilatação térmica diferentes, se curvam quando ocorre variação da temperatura na qual foram unidos, sendo muito usadas como dispositivos de abertura e fechamento de correntes de sistemas elétricos. No concreto armado o que se busca é o comportamento inverso. Uma das razões pela qual o material apresenta boa capacidade de uso é o fato de o aço e o concreto dilatarem de maneira bem parecida, não aparecendo tensões consideráveis no contato entre os dois componentes em consequência da variação de temperatura.

2.2.3 Tensão térmica

2.2.3.1 Restrição da dilatação térmica

Quando a temperatura de um corpo aumenta ele tende a dilatar-se, mas se a sua dilatação for impedida, surgirá uma tensão térmica. Beer et al. (2011), explicam o

surgimento da tensão usando a ideia simplificada de que hipoteticamente em um primeiro momento o corpo está livre para expandir, uma vez atingida a expansão, passa a agir forças normais à expansão fazendo com que o corpo volte a sua dimensão anterior, causando uma tensão compatível com o deslocamento ocorrido.

De maneira simplificada a tensão térmica (σ) é obtida em função da variação de temperatura, do coeficiente de dilatação térmica (ΔT) e do módulo de elasticidade (E) do material pela equação (20).

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad (20)$$

2.2.3.2 Gradiente térmico

Quando o corpo tem grandes dimensões e sofre um aquecimento ou resfriamento rápido do exterior, de modo que as regiões mais próximas a superfície fiquem com temperaturas diferentes das do interior, formando um gradiente térmico, passa a existir expansão dimensional diferencial, formando tensões de natureza térmica. Se a superfície sofre um resfriamento superior ao interior, a parte externa do corpo fica tracionada enquanto a interna sofre compressão. A situação das tensões se invertem em casos de aquecimento da superfície superior ao interior.

2.2.3.3 Choque térmico em materiais frágeis

Os materiais frágeis não sofrem deformação plástica como os materiais dúcteis e além disso tendem a não resistir às tensões de tração, por isso estão mais propensos a sofrerem com fraturas frágeis e a propagação de trincas. Quando ocorre o resfriamento rápido da superfície existe tensão de tração nesta parte do material, configurando o caso mais propenso para a ocorrência do choque térmico e a fissuração.

A possibilidade de ocorrência deste problema aumenta com o aumento do gradiente de temperatura, mas depende também das propriedades térmicas e mecânicas do material. Sendo observado aumento com a diminuição da resistência a tração e da condutividade térmica, e com o aumento do módulo de elasticidade e do coeficiente de dilatação térmica (CALLISTER, 2008).

2.2.4 Transferência de calor

Basicamente existem três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Eles podem ocorrer de maneira simultânea ou não de acordo

com o caso. De acordo com Çergel (2009), a transferência de calor no interior sólidos opacos é apenas por condução, mas por condução e radiação em sólidos semitransparentes. Não ocorrendo por convecção em nenhum caso. A transferência de calor por convecção pode ser observada nas superfícies expostas a um fluido ou a outras superfícies. Em fluidos, condução e convecção são excludentes, ocorrendo a primeira quando o fluido está em repouso e a segunda quando está em movimento. Em ambos os casos podendo ser acompanhada da transferência por radiação. No vácuo a única forma de transferência de calor possível é por radiação já que os outros mecanismos dependem da existência de um meio material.

2.2.4.1 Condução

Condução é a transferência de energia resultante da interação de partículas de maior energia de uma dada substância com partículas adjacentes de menor energia. A condução de calor é uma grandeza vetorial, em que a taxa de condução de calor através de uma camada plana é proporcional à diferença de temperatura e a área de transferência de calor, mas inversamente proporcional à espessura da camada.

Os problemas de transferência de calor podem ser classificados em regime permanente ou transiente. O fluxo de calor, no regime permanente não sofre variação em nenhum ponto do meio ao longo do tempo, enquanto no regime transiente ocorre variações.

A taxa de condução de calor (\dot{Q}) no tempo para uma camada plana de área (A) para variações de temperatura (ΔT) e de espessura (Δx) pode ser obtida pela equação (21), onde k é a condutividade térmica, uma constante que depende do material de que é feita a placa, cuja unidade é W/m·K. A equação é válida para o regime permanente.

$$\dot{Q} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (21)$$

A condutividade térmica é definida por Çergel (2009) como a taxa de transferência de calor através de uma unidade de comprimento de dado material por unidade de área por unidade de diferença de temperatura. Um material que transfere facilmente energia por condução é um bom condutor de calor e tem um alto valor de k. Nos casos de baixos valores de k o material é dito isolante. Os metais são bons condutores térmicos devido à grande quantidade de elétrons livres que possuem, mas os melhores condutores são os cristais não metálicos como o diamante e o grafite. Já os

valores mais baixos de condutividade são encontrados nos gases. No caso dos materiais sólidos, são bons isolantes térmicos a madeira e a espuma. A condutividade térmica de um material, em geral, varia com a temperatura. Mas resultados suficientemente precisos podem ser obtidos ao utilizar um valor constante para a condutividade térmica usando uma temperatura média (ÇERGEL, 2009).

2.2.4.2 Convecção

Convecção é o modo de transferência de calor entre uma superfície sólida e o líquido ou gás adjacente que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e movimento do fluido. A explicação do fenômeno está no fato da temperatura da parte do fluido que está em contato com o objeto quente aumentar, ocorrendo expansão e conseqüentemente redução da densidade. Com isso o fluido agora mais leve do que o fluido que o cerca tende a subir e o fluido mais frio escoar para tomar o seu lugar, podendo o processo ocorrer indefinidamente.

Quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento de uma massa de fluido, a transferência de calor entre uma superfície sólida e o fluido adjacente é toda por condução. A presença de movimento de uma massa de fluido aumenta a transferência de calor entre eles, mas isso também dificulta a determinação das taxas de transferência de calor (ÇERGEL, 2009).

A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura, e pode ser adequadamente representada pela Lei de Newton do resfriamento pela equação (22).

$$\dot{Q} = -hA(T_s - T_\infty) \quad (22)$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção que pode ser expresso em $W/m^2 \cdot ^\circ C$, A é a área da superfície através da qual a transferência de calor por convecção ocorre, T_s , é a temperatura da superfície, e T_∞ é a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície.

De acordo com Çergel (2009), o coeficiente de transferência de calor por convecção é um parâmetro determinado experimentalmente, cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, tais como a geometria da superfície, natureza

do movimento do fluido e suas propriedades além da velocidade da sua massa. Este coeficiente não é então uma propriedade dos materiais envolvidos.

2.2.4.3 Radiação

Radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas resultantes das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas. A transferência de calor por radiação não exige a presença de um meio material. Com isso a radiação térmica, que é a forma de radiação emitida pelos corpos devido à sua temperatura é a mais rápida forma de transferência de calor. Todos os corpos a uma temperatura superior ao zero absoluto emitem radiação térmica (ÇERGEL, 2009).

Para os sólidos que são opacos à radiação térmica, este é um fenômeno superficial, uma vez que a radiação emitida pelas regiões do interior de tal material não chegam à superfície e a radiação incidente sobre tais corpos normalmente é absorvida dentro de alguns microns a partir da superfície (ÇERGEL, 2009).

Quando uma superfície de emissividade ε , área superficial A e temperatura T_s , é completamente delimitada por uma superfície muito maior a uma temperatura termodinâmica T_{arr} , separadas por um gás que não intervém na radiação, a taxa líquida de transferência de calor por radiação entre essas duas superfícies é dada pela equação (23).

$$\dot{Q} = -\varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{arr}^4) \quad (23)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e vale $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. O valor da emissividade da superfície fica na faixa entre 0 e 1 e é uma medida de quanto uma superfície aproxima-se do comportamento de um corpo negro, caracterizado por realizar a máxima emissividade de radiação.

2.2.4.4 Equação geral da condução de calor

A determinação da distribuição de temperatura ao longo do meio é importante para calcular alguns valores como a taxa local de transferência de calor, expansão térmica e tensão térmica em alguns pontos críticos, em determinados momentos. Esses valores possuem grande utilidade em aplicações práticas de engenharia.

A equação geral da transferência de calor em um sistema tridimensional cartesiano pode ser obtida da lei da condução de calor de Fourier, expressa pela equação (24),

que é uma generalização da equação (21) na forma diferencial para problemas unidimensionais. Onde dT/dx é o gradiente de temperatura, e \dot{q} é o fluxo de calor por unidade de tempo e por unidade de área.

$$\dot{q} = -k \frac{dT}{dx} \quad (24)$$

Para tanto a equação (24) é aplicada a um elemento de dimensões infinitesimais em cada uma de suas direções principais. De acordo com a lei da conservação da energia, a diferença da taxa de condução de calor entre a entrada e a saída do elemento, somada com a taxa de geração de calor no seu interior deve ser igual a taxa de mudança de energia do elemento como um todo. Com base nessas informações a equação (25) é a equação geral de condução de calor para coordenadas retangulares x , y e z . Sua dedução pode ser observada em Çergel (2009).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (25)$$

Onde:

\dot{e} : é a taxa de geração de calor no elemento por unidade de volume;

ρ : é a densidade do material;

c : é o calor específico do material;

t : tempo.

No caso em que a transferência é permanente, sem geração de calor e com condutividade térmica constante, a equação (25) é reduzida à equação (26) chamada de equação de Laplace.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (26)$$

Para a resolução desta equação são necessários o conhecimento das condições de contorno do problema. A solução para os problemas de condução de calor transiente depende da condição do meio no começo do processo de condução de calor, a chamada condição inicial, que é uma expressão matemática para a distribuição inicial de temperatura do meio. A descrição matemática completa de um problema de

condução de calor requer a especificação de duas condições de contorno para cada dimensão na qual a condução de calor é relevante e uma condição inicial quando o problema é transiente. As condições de contorno mais comuns são: temperatura em determinados pontos, fluxo de calor especificado, convecção e radiação.

2.3 Relações entre concreto e temperatura

As propriedades do concreto são diretamente ligadas à temperatura do ambiente em que encontra exposto. Quando o concreto se encontra no estado fresco a variação de temperatura influencia o início da pega, a velocidade de ganho de resistência e a resistência final. Quando está endurecido, a mudança de temperatura altera a resistência e a elasticidade do concreto. Além da temperatura do ambiente outra fonte de variação térmica é a geração de calor interna que ocorre durante a reação de hidratação, e que também tem influência sobre o comportamento do concreto fresco e endurecido.

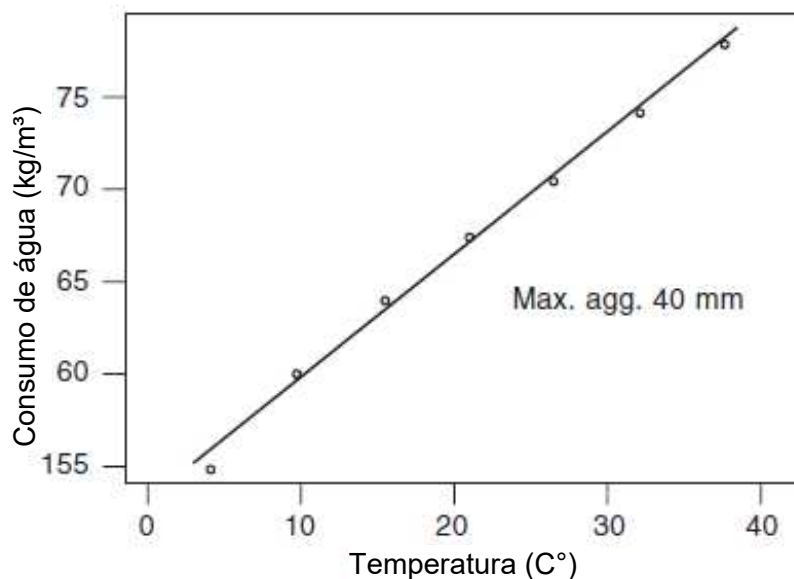
2.3.1 Produção do concreto e trabalhabilidade

O primeiro efeito da temperatura ambiente que se pode ser observar no concreto fresco já é visualizado durante sua produção. De acordo com Li (2011) seu aumento de valor acarreta maior demanda de água para se obter uma determinada trabalhabilidade. Já em situações de baixa temperatura os materiais podem sofrer congelamento formando cristais de gelo e têm o início de pega retardado.

O aumento do consumo de água causa problemas futuros para o material devido ao aumento da porosidade tendo como consequência a logo prazo a redução da durabilidade e da resistência e em curto prazo o aumento da retração por secagem. A Figura 2 apresenta o comportamento característico da demanda de água com base na temperatura para concretos convencionais para obter 75 mm de abatimento de troco de cone.

O congelamento retarda o ganho de resistência do concreto e a expansão da água aumenta sua porosidade. Com isso a retirada das fôrmas deve aguardar um tempo maior e a resistência final do concreto fica bem prejudicada, podendo chegar a ser da ordem de 50 % do valor para o mesmo material em temperaturas normais (LI, 2011).

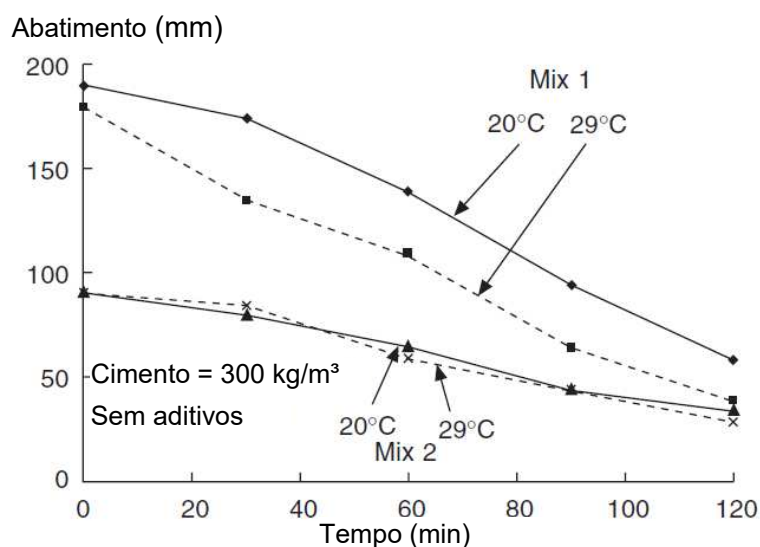
Figura 2 – Consumo de água em função da temperatura



Fonte: Li (2011).

No caso da trabalhabilidade, com o aumento da temperatura ela reduz mais rapidamente com o passar do tempo. Isso porque a taxa de hidratação do concreto e a perda de água por evaporação se tornam mais rápidas em altas temperaturas. A perda de trabalhabilidade é mais evidente com o aumento do abatimento do concreto como pode ser visto na Figura 3, que relaciona o abatimento do troco de cone com o tempo para dois diferentes concretos sem aditivos (Mix 1 e Mix 2). Para a mistura de maior trabalhabilidade fica evidente que essa propriedade tende a diminuir com o aumento da temperatura.

Figura 3 – Perda de trabalhabilidade no tempo

Fonte: Previte, 1977 *apud* Newman e Choo (2003a).

2.3.2 Influência do ambiente na cura

O aumento da temperatura do ambiente faz com que a pega do concreto se inicie mais rapidamente e a velocidade de ganho de resistência seja mais alta. Já as baixas temperaturas tendem a retardar os dois processos.

2.3.2.1 Ambiente frio

Para concreto em ambiente frio, quando sua temperatura cai abaixo de -10°C ocorre seu congelamento e não ocorre ganho de resistência. Dessa forma são necessárias medidas para impedir a sua perda de temperatura no início do processo. Resolvido este problema, iniciada a hidratação, o calor gerado pelo concreto é suficiente para manter a temperatura em condições adequadas para que o ganho de resistência ocorra. (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Para que o calor gerado no concreto seja suficiente existe uma temperatura mínima para o material durante seu lançamento que depende da temperatura ambiente e da espessura da peça a se concretar. Quanto menor a temperatura ambiente maior é a temperatura exigida, pois nestas condições a perda de calor para o ambiente é acentuada. Para a espessura da peça quanto maior, menor será a temperatura necessária. Isso ocorre, pois, a perda de temperatura se torna menor devido ao maior valor de calor gerado em seu interior. A Tabela 3 apresenta valores recomendados para a temperatura do concreto em diferentes casos de acordo com o trabalho de Mehta e Monteiro (2006).

Tabela 3 – Temperaturas recomendadas para o concreto

Temperatura Ambiente	Espessura da peça			
	< 30 cm	30 cm – 90 cm	90 cm – 180 cm	>180 cm
> -1°C	16	13	10	7
Entre -18°C e -1°C	18	16	13	10
< -18°C	21	18	16	13

Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

Para se obter a temperatura necessária do concreto o que se faz é aquecer a água e os agregados. A água é o componente mais adequado a se aquecer devido a maior facilidade de realizar o processo e pelo fato de possuir um calor específico maior que os demais elementos.

As principais preocupações que se deve tomar em concretagens nestas condições é com o consumo exagerado de água e a manutenção do concreto em temperatura muito alta. Um consumo de água acima do necessário para a hidratação pode causar expansão do material quando esta se solidifica. Concreto em temperatura bem superior ao ambiente perde calor em uma taxa maior e causa um gradiente térmico e geração de tensões consideráveis. Além disso para a sua trabalhabilidade será exigida mais água, o que pode acarretar no problema anterior além dos problemas já mencionados decorrentes do alto consumo de água.

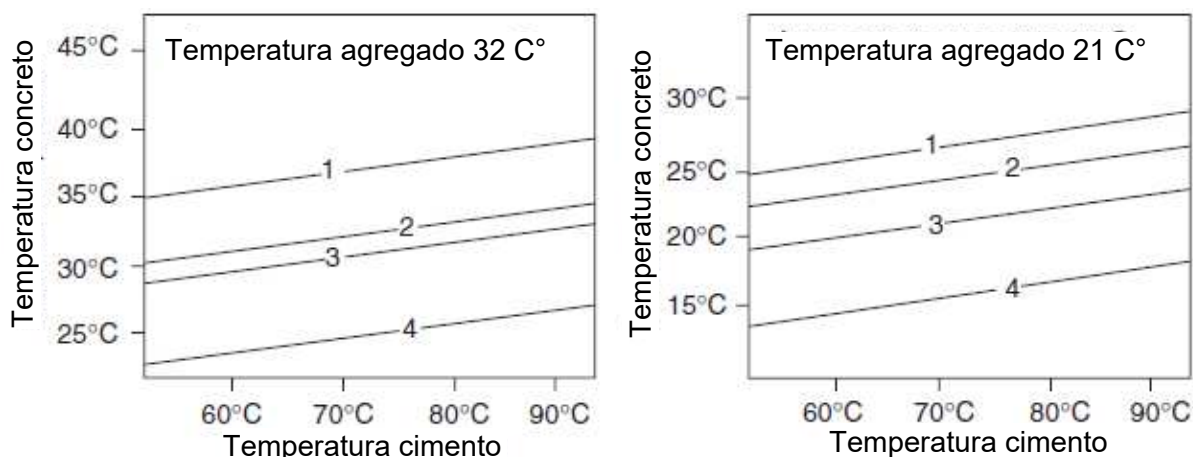
2.3.2.2 Ambiente quente

Em ambiente quente, o que se observa é a alta temperatura do concreto, maior consumo de água e perda rápida de trabalhabilidade com necessidade de adição de mais água na mistura durante a concretagem. Quanto à resistência, o ganho é mais rápido com observação de maiores valores aos 28 dias mas menores em idades superiores quando comparado com concretos com mesmas características mantidos em ambientes de temperaturas relativamente baixas (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Para reduzir a temperatura do concreto as principais técnicas usadas são o uso de água gelada ou substituição de parte da água por gelo, uso de cimento de baixo calor de hidratação, aditivos superplastificantes e retardadores de pega (LI, 2011). Entre o gelo e a água fria, o primeiro se mostra mais eficiente devido a necessidade de passar por uma mudança de fase, processo que demanda importante consumo de energia térmica.

O gelo em forma de escamas é o mais adequado para uso pela facilidade de mistura. O uso de gelo em forma de cilindros furados também é adequado, entretanto demanda maior tempo de mistura do concreto (ACEWEB, 2018). A vantagem do uso do gelo para reduzir a temperatura do concreto pode ser observada pelos gráficos da Figura 4. Nesta análise é mostrada a variação da temperatura inicial do concreto em função da temperatura do cimento, dos agregados e da água e gelo usados. Na curva 1 é utilizada apenas água na mesma temperatura dos agregados, na curva 2, água a 10°C, na 3 água na temperatura dos agregados com substituição de 25% de seu volume por gelo e na 4 água na temperatura dos agregados com substituição de 50% de seu volume por gelo.

Figura 4 – Variação da temperatura do concreto com uso de água e gelo



Fonte: Li (2011).

Outras preocupações que se deve tomar com o concreto neste tipo de ambiente é com a rapidez no lançamento, cuidado no adensamento e com a cura. A demora no lançamento acarreta em perda de trabalhabilidade e conseqüentemente prejuízos nas propriedades do concreto endurecido. Devido a sua rapidez de ganho de resistência caso ocorra vibração por imersão não se deve atingir camadas inferiores já concretadas anteriormente pois estas já estão com certa resistência. Em relação a cura, neste tipo de ambiente geralmente a umidade do ar é mais baixa e isso juntamente com a temperatura aumenta a perda de umidade pelo concreto, que deve ser mantido em condição de saturação através de cura cuidadosa.

2.3.2.3 Cura térmica

A cura térmica à vapor é caracterizada pelo uso de uma temperatura superior à temperatura ambiente, em condições de controle de temperatura e umidade. O objetivo principal da técnica é acelerar as reações de hidratação do cimento, tendo como resultado o ganho de resistência, para que o concreto possa ser manuseado nas primeiras idades, técnica muito vantajosa para estruturas pré-moldadas.

Embora a resistência mecânica inicial do concreto se comparada com a cura normal, aumente, nas idades finais se torna menor. De acordo com Santos e Barbosa (2011) essa redução se deve à microestrutura modificada pelas condições do ambiente. As autoras estudaram o comportamento de diferentes concretos auto adensáveis e constataram que o comportamento é semelhante ao dos concretos convencionais. Observando que ao aumentar a temperatura e prolongar o período de cura, as resistências iniciais melhoraram, mas isso não influenciou a resistência com a idade.

Destacam também que o tipo de cimento e seu calor de hidratação contribuem para diferentes valores de resistência para mesma condição de cura.

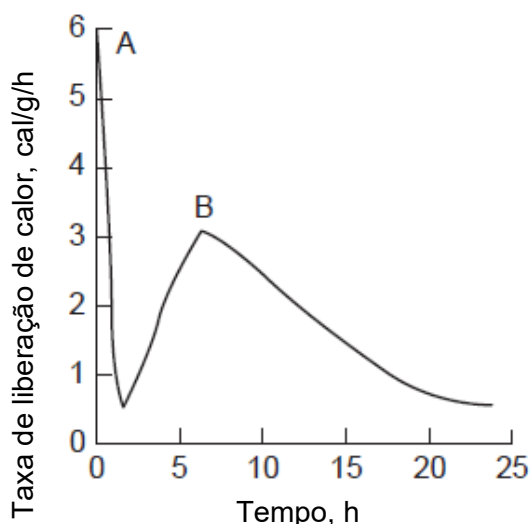
2.3.3 Calor de hidratação

A reação de hidratação do cimento é exotérmica e termo ativada (COLIMODIO, 2016). O que quer dizer que a reação libera energia em forma de calor e que quanto maior a temperatura inicial do cimento maior será a velocidade de hidratação e, conseqüentemente, a taxa de liberação de calor e de aumento de temperatura.

De acordo com Mehta e Monteiro (2006) a curva da taxa de geração de calor no tempo é caracterizada por um ponto de mínimo e dois pontos de máximo como mostra a Figura 5. Essa característica é justificada pelas diferentes velocidades e formas das diversas reações químicas da hidratação.

Para entender a Figura 5, Mehta e Monteiro (2006) explicam que assim que o cimento é misturado com água, ocorre uma elevação rápida da geração de calor alcançando o pico A do gráfico. Esse fenômeno dura alguns minutos e representa o calor advindo da solução de aluminatos e sulfatos. Depois a reação cessa rapidamente quando ocorre perda de solubilidade dos aluminatos pela presença de sulfato na solução. O próximo ciclo de evolução térmica, atinge o segundo pico (B) após um tempo geralmente ente 4 e 8 h para a maioria dos cimentos Portland. Esse ciclo representa o calor de formação da estringuíta. Acredita-se que a evolução do calor nesse período também inclui as reações do C_3S e a formação de C-S-H. O pico B corresponde ao momento em que finaliza a pega e se inicia o endurecimento do concreto.

Figura 5 – Taxa de geração de calor no tempo



Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

O calor gerado por cada tipo de cimento é consequência da porcentagem de cada um de seus principais compostos, visto que cada um deles apresenta valores bem característicos de geração de calor como pode ser visto na Tabela 4. Dessa forma quanto maior a as proporções de silicato e aluminato tricálcico no cimento maior será seu calor de hidratação. Outro ponto importante é que a geração de calor continua por um longo período de tempo mas que aproximadamente 50% do seu valor ocorre antes dos 3 dias e 70% antes dos 7 dias.

Tabela 4 – Calor de hidratação dos componentes do cimento em (cal/g)

Composto	3 dias	90 dias	13 anos
C ₃ S	58	104	122
C ₂ S	12	42	59
C ₃ A	212	311	324
C ₄ AF	69	98	102

Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

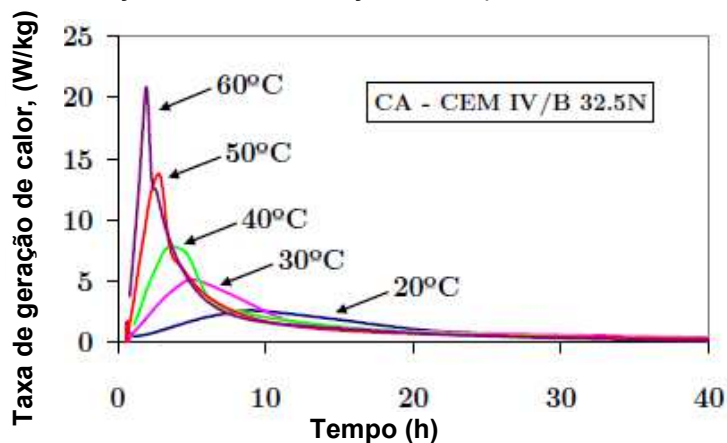
Os cimentos de baixo calor de hidratação apresentam uma hidratação mais lenta e são indicados para uso em estruturas de grande volume. Se mostram adequados pois o baixo aumento de temperatura ocasionado diminuirá o gradiente térmico entre o interior e a superfície da massa evitando ou amenizando as fissuras causadas pela diferença de dilatação.

Dentre os cimentos comercializados no Brasil os que apresentam os menores calores de hidratação são os pozolânicos CP IV e os de alto forno CP III. Entretanto qualquer cimento comercializado pode ser classificado como de baixo calor de hidratação desde que gerem até 260 J/g aos 3 dias e até 300 J/g aos 7 dias de hidratação e são identificados para comércio pela sigla BC após o código de identificação do seu tipo. O que tipo que apresenta o maior calor de hidratação é o CP V-ARI (ABCP, 2002).

A consequência da termoativação da reação pode ser observada na Figura 6, que apresenta os valores da taxa de geração de calor para um cimento pozolânico para diferentes temperaturas iniciais do concreto. Azenha (2009) variou a temperatura dos principais cimentos usados em Portugal, e em todos os casos observou-se que o aumento da temperatura aumenta a taxa de geração de calor e além disso faz com que seu pico ocorra mais rapidamente. Observou também que o calor total gerado

não se torna necessariamente maior, não obedecendo nenhum padrão com base na temperatura.

Figura 6 – Geração de calor em função da temperatura inicial do concreto



Fonte: Azenha (2009).

A taxa de geração de calor pode ser obtida de maneira experimental utilizando calorímetros adiabáticos, semi adiabáticos e isotérmicos. Os dois primeiros se mostram adequados para uso com pasta de cimento argamassa e concreto, mas o resultado coletado é a variação de temperatura, sendo necessário o uso de equacionamento analítico para obtenção do calor gerado, levando a uma obtenção de maneira indireta. Outro ponto negativo é a necessidade da determinação prévia do calor específico da amostra antes do ensaio. O calorímetro semi adiabático foi usado por Hilaire (2014), que relatou estas limitações. Os isotérmicos permitem a determinação direta do calor gerado.

Em seus trabalhos experimentais Azenha (2009), utilizou o calorímetro isotérmico para determinar a curva de geração de calor e a taxa de geração de calor em diferentes amostras de argamassa para caracterizar diferentes cimentos. De acordo com este autor, essa forma de ensaio exige apenas pequenas amostras de aproximadamente 45g de pasta de cimento ou argamassa, não permitindo testes diretos no concreto.

Azenha (2009) não considera esse fato uma desvantagem significativa, já que a parte responsável pela geração de calor no concreto é a pasta de cimento. Assim, após o conhecimento do conteúdo volumétrico da pasta de cimento dentro concreto, é possível obter a geração de calor esperada. Esta técnica é válida desde que os agregados não afetem a cinética de hidratação do cimento, o que geralmente é o caso da grande maioria dos concretos.

A taxa de geração de calor \dot{Q} em W/kg de cimento também pode ser calculada de maneira numérica. Para isso é necessário definir alguns parâmetros.

O grau de geração de calor é geralmente representado por α_T , sendo $\alpha_T = 0$ quando a hidratação ainda não começou e $\alpha_T = 1$ quando o processo de hidratação está encerrado. É definido pela razão entre o calor acumulado em cada instante $Q(t)$ e o calor total acumulado Q_{Total} como mostra a equação (27).

$$\alpha_T = \frac{Q(t)}{Q_{Total}} \quad (27)$$

Quando a taxa de geração de calor \dot{Q} é representada graficamente em função do grau de geração de calor $\dot{Q}(\alpha_T)$, seu valor aumenta com o aumento da temperatura de maneira semelhante ao caso da Figura 6. Mas quando os valores de cada uma destas curvas são divididos pelo seu valor de máximo \dot{Q}_{pico} e se plota esses resultados em função do grau de geração de calor todas elas assumem a mesma forma ficando sobrepostas. Esta curva é chamada de taxa de calor normalizada e é representada pela equação (28)

$$f(\alpha_T) = \frac{\dot{Q}(\alpha_T)}{\dot{Q}_{pico}} \quad (28)$$

Segundo Azenha (2009), a equação de Arrhenius é um modelo proposto para descrever a cinética das reações químicas ativadas termicamente. A equação (29) é derivada deste modelo e representa a parte de geração de calor no cimento que depende da temperatura de ativação. O termo A_T é uma constante que depende do tipo de cimento, R é a constante do gás ideal (8,314 J/mol · K) e E_a é a energia de ativação aparente (J/mol) e T é a temperatura em K.

O valor de E_a representa a energia que uma molécula no estado inicial do processo deve adquirir antes que ele possa participar de uma reação. É chamada aparente pois não representa uma única reação química mais sim todo o conjunto das reações que ocorrem na hidratação do concreto. Seu valor assim como o de A_T pode ser obtido experimentalmente (AZENHA, 2009).

$$g(T) = A_T e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (29)$$

De acordo com Reinhardt *et al.* (1982) *apud* Azenha (2009) a taxa de geração de calor pode ser descrita pelo produto das funções independentes, $f(\alpha_T)$ que considera o desenvolvimento de calor ao longo da hidratação e $g(T)$ que trata da influência da temperatura de ativação. Dessa forma a taxa de geração de calor nas reações químicas de hidratação do concreto é representada pela equação (30).

$$\dot{Q} = f(\alpha_T)A_T e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (30)$$

Azenha (2009), determinou os coeficientes necessários para cálculo da taxa de geração de calor para os principais tipos de cimento usado em Portugal. Depois comparou valores obtidos em análises experimentais com os obtidos com esse equacionamento obtendo valores próximos, validando o modelo.

Vale ressaltar que com essa equação e os coeficientes determinados é possível obter a taxa de geração de calor para 1 kg de cimento de qualquer um destes tipos. Mas a taxa de calor gerada por um volume qualquer de concreto pode ser obtida multiplicando o valor obtido pela massa de cimento consumida. Obtendo assim a taxa por volume de concreto, que é o valor adequado para entrada na equação (25) para determinação da temperatura dos diferentes pontos do concreto.

Outros modelos foram desenvolvidos para calcular a taxa de geração de calor no concreto. Uma formulação semelhante à apresentada foi desenvolvida por Ulm e Coussy (1995), onde a diferença é seu tratamento da parte dependente da hidratação em função de seu desenvolvimento ao invés da taxa de geração de calor.

Outra formulação numérica que tem destaque na literatura é o modelo DuCOM desenvolvido por Maekawa em 1999 que trata da geração de calor de cada um dos principais componentes do cimento e define a taxa de geração do cimento como a soma dos valores produzidos por cada um destes (AZENHA, 2009). Este modelo analisa também a porosidade e o transporte de umidade no concreto.

2.3.4 Retração

A retração hidráulica está relacionada à perda de água, que por sua vez se intensifica com o aumento da temperatura. É influenciada indiretamente pela temperatura gerada pelo concreto e o ambiente. Já a retração térmica esta é consequência direta da temperatura.

A retração térmica é um fenômeno importante pois o concreto está mais suscetível a ter problemas devido às tensões de retração devida ao resfriamento do ambiente do que devidas à expansão causada pelo calor gerado na hidratação. Isso porque, dependendo do módulo de elasticidade e o grau de restrição dos movimentos, a tensão de tração resultante pode ser grande o suficiente para causar fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

O problema se torna mais grave em estruturas de grandes volumes. A perda de calor para o ambiente, que em geral é mais frio que o concreto nos primeiros dias, devido a sua hidratação, causa um gradiente térmico considerável entre sua superfície e interior. Esse gradiente leva a superfície a sofrer retração, mas como essa retração é diferente do interior surgirá uma tensão de tração na superfície que associada à baixa resistência mecânica do concreto nos primeiros dias pode ocasionar fissuras.

Para evitar esse problema deve-se tomar cuidados na etapa construtiva para controlar a elevação da temperatura que é feita através da seleção de materiais apropriados, proporções de mistura, condições de cura, e prática de construção. Os cuidados para redução da temperatura do concreto já mencionados para o caso de ambiente quente se aplica a este caso. O uso de gelo é comum em estruturas de grandes volumes como barragens.

2.3.5 Fluência

A temperatura é um dos principais fatores ambientais que afeta as deformações dependentes do tempo. Muitas investigações mostram que a deformação de fluência aumenta significativamente com o aumento da temperatura.

De acordo com Hilaire (2014), mantendo a temperatura constante, a fluência básica específica aumenta com a temperatura. O fenômeno é influenciado pela hidratação, onde a evolução da temperatura no interior do concreto altera o comportamento visco-elástico do material, levando ao fenômeno nas primeiras idades. Hilaire (2014), ainda comenta que, se o concreto é sujeito a variações de temperatura, as deformações térmica e de fluência estão correlacionadas.

De acordo com Colimodio (2016) para o completo entendimento da influência da temperatura na fluência é preciso conhecer o histórico de temperatura e suas variações antes e durante o carregamento. O aumento de temperatura antes do carregamento por um longo período acelera o processo de hidratação do concreto e

seu ganho de resistência, reduzindo a fluência tanto nas primeiras idades quanto ao longo do tempo. Segundo Atrushi (2003) para variação de temperatura durante o carregamento, sem manutenção de equilíbrio térmico, ocorre aumento da taxa de fluência.

2.3.6 Propriedades térmicas do concreto

2.3.6.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica do concreto é influenciada pela idade, relação água-cimento, tipos de aditivos, traço, temperatura e umidade. Para o concreto endurecido com temperatura próxima de 20°C de acordo com Azenha (2009), o valor de k pode variar de 1,2 W/m·K até 3,6 W/m·K obtidos de estudos de diferentes autores. A principal razão para esta ampla faixa de variação é o tipo de agregado, que tem grande influência sobre a condutividade do concreto.

O valor da condutividade térmica do concreto pode ser obtido pela equação (31) em função do consumo de cimento, água e agregados. O que se faz é ponderar a condutividade térmica de cada constituinte (Cimento k_{cim} , Água $k_{água}$, Agregados k_{ag}) pelo seu peso específico (Cimento δ_{cim} , Água $\delta_{água}$, Agregados δ_{ag}). A Tabela 5 apresenta valores que podem ser usados para a obtenção da condutividade térmica dos principais tipos de concretos produzidos para diferentes temperaturas.

$$k = \frac{\delta_{cim}k_{cim} + \delta_{água}k_{água} + \delta_{ag}k_{ag}}{\delta_{cim} + \delta_{água} + \delta_{ag}} \quad (31)$$

Tabela 5 – Condutividade térmica dos principais componentes do concreto

Material	Condutividade térmica (W/m·K)		
	21,1°C	32,2°C	43,3°C
Água	0,60	0,60	0,60
Cimento	1,23	1,27	1,31
Quartzo	3,09	3,08	3,07
Basalto	1,91	1,90	1,90
Granito	3,03	2,90	2,90

Fonte: Azenha (2009).

A condutividades do concreto se torna maior com o aumento da umidade. Por isso varia no estado fresco e ao longo do processo de hidratação, apresentando valores maiores que no estado endurecido. Para De Schutter e Taerwe (2002) *apud* Azenha (2009) o valor de k é até 10% maior que no caso do concreto endurecido. Para Ruiz *et al.* (2001) *apud* Azenha (2009) pode chegar até a um valor 33% superior. Em ambos os casos o valor máximo ocorre no início da hidratação e decresce de maneira linear até seu final.

Azenha (2009) após comparar os resultados com uso de k variável e constante, concluiu-se que o efeito da variação de k ao longo da hidratação têm uma influência quase desprezível nas temperaturas, podendo ser adotado como um valor constante.

A ABNT NBR 15200:2012 permite que a condutividade térmica do concreto de densidade normal com agregado silicoso seja calculada pela equação (32) para temperaturas T variando de 20°C a 1200°C. De maneira simplificada permite ainda o uso de $k=1,3 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$.

$$k(T) = 1,36 - 0,136 \frac{T}{100} + 0,0057 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \quad (32)$$

2.3.6.2 Calor específico

Como no caso anterior de acordo com Hilaire (2014), o calor específico de um concreto depende da natureza dos agregados, traço, temperatura, umidade e grau de hidratação do concreto. A faixa de variação deste parâmetro considerando diferentes autores vai de 850 J/kg · K até 1170 J/kg·K (AZENHA, 2009). O calor específico do concreto pode ser determinado pela equação (33).

O que se faz é ponderar o calor específico de cada constituinte (Cimento k_{cim} , Água $k_{água}$, Agregados k_{ag}) pelo seu peso específico (Cimento δ_{cim} , Água $\delta_{água}$, Agregados δ_{ag}) e subtrair uma parcela relativa à água ligada fisicamente ou quimicamente aos constituintes do concreto que envolve um coeficiente $c_{água.Ligada}=0,2$, e o grau de hidratação do concreto α . A Tabela 6 apresenta valores que podem ser usados para a obtenção do calor específico dos principais tipos de concretos produzidos para diferentes temperaturas.

$$c = \frac{\delta_{cim}c_{cim} + \delta_{água}c_{água} + \delta_{ag}c_{ag} - c_{água.Ligada}c_{água}\alpha}{\delta_{cim} + \delta_{água} + \delta_{ag}} \quad (33)$$

Tabela 6 – Condutividade térmica dos principais compoentes do concreto

Material	Calor específico (J/kg · K)		
	21,1°C	32,2°C	43,3°C
Água	4187	4187	4187
Cimento	456	536	662
Quartzo	699	745	795
Basalto	766	758	783
Granito	716	708	733

Fonte: Azenha (2009).

A água apresenta um calor específico da ordem de 4 a 5 vezes o dos agregados e quase 10 vezes o do cimento. Como resultado, o teor de água do concreto influencia fortemente a sua capacidade de absorver calor. O aumento da temperatura faz com que os constituintes do concreto aumentem seu calor específico, dessa forma influenciando o todo.

Durante a hidratação do concreto o aumento da temperatura contribui para o aumento de c , mas a evolução da hidratação contribui para sua diminuição através da redução da quantidade de água não combinada. Por essa razão não existe consenso sobre o comportamento adequado do coeficiente, tendo alguns autores que defendem que ele decresce com a evolução da hidratação e outros que afirmam que ele pode ser considerado constante. Azenha (2009) mostra que é razoável considerar constantes os parâmetros térmicos durante a hidratação, mas destaca que o tema carece de mais estudos.

A ABNT NBR 15200:2012 permite que o calor específico do concreto sem umidade com uso de agregado silicoso ou calcário pode ser calculado pela equação (34).

$$\begin{aligned}
 c(T) &= 900 \text{ (J/kg} \cdot \text{°C)}, & \text{se } 20 \text{ °C} \leq T \leq 100 \text{ °C} \\
 c(T) &= 900 + (T - 100) \text{ (J/kg} \cdot \text{°C)}, & \text{se } 100 \text{ °C} < T \leq 200 \text{ °C} \\
 c(T) &= 900 + (T - 200)/2 \text{ (J/kg} \cdot \text{°C)}, & \text{se } 200 \text{ °C} < T \leq 400 \text{ °C} \\
 c(T) &= 1100 \text{ (J/kg} \cdot \text{°C)}, & \text{se } 400 \text{ °C} < T \leq 1200 \text{ °C}
 \end{aligned} \tag{34}$$

Quando da presença de umidade esta pode ser considerada no equacionamento com o acréscimo de um valor de pico constante entre 100 °C e 115 °C com decréscimo linear até 200 °C. Os valores apresentados na referida norma para o pico são 900 J/kg

· K para umidade de 0%, 1470 J/kg · K para umidade de 1,5% e 2020 J/kg · K para umidade de 3%.

De forma simplificada a relação entre calor específico e temperatura pode ser considerada constante e adotada com 1000 J/kg · K.

2.3.6.3 Dilatação térmica

Para o concreto endurecido o coeficiente de dilatação térmica depende do tipo de agregados e da umidade do concreto. Pode variar entre aproximadamente $6 \cdot 10^{-6}/K$ e $15 \cdot 10^{-6}/K$ para concretos normais e entre $5 \cdot 10^{-6}/K$ e $11 \cdot 10^{-6}/K$ (MODEL CODE, 2013). De acordo com Hilaire (2014), o aumento da temperatura também causa o aumento do coeficiente.

Segundo Hilaire (2014) para o concreto fresco, se observa os valores mais altos de dilatação térmica no início da hidratação. Pois é como se o concreto se comportasse como um líquido onde seus componentes estão livres para sofrerem variações volumétricas. O concreto estudado por Hilaire (2014) apresentou nessa fase valores da ordem de $29 \cdot 10^{-6}/K$. Após essa fase ocorre uma queda até que se atenda os valores usuais para o concreto endurecido. A forma em que se dá essa queda não possui consenso na literatura, onde alguns autores acreditam que exista um ponto de mínimo e outros não.

De acordo com o Model Code (2013), para efeito de projeto, um valor de $10 \cdot 10^{-6}/K$ pode ser usado para concretos normais, de alta resistência e autoadensável. Para concretos leves adota-se o valor de $8 \cdot 10^{-6}/K$. A ABNT NBR 6118:2014 recomenda o uso de $10^{-5}/^{\circ}C$ para efeito de análise estrutural. Para altas temperatura a ABNT NBR 15200:2012 prevê que o alongamento específico do concreto sob ação térmica pode ser calculado pela equação (35) ou de forma simplificada pela equação (36).

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{L} &= 9 \cdot 10^{-6}T + 2,3 \cdot 10^{-11}T^3 - 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ se } 20^{\circ}C \leq T \leq 700^{\circ}C \\ \frac{\Delta l}{L} &= 14 \cdot 10^{-3} \text{ se } 700^{\circ}C < T \leq 1200^{\circ}C \end{aligned} \quad (35)$$

$$\frac{\Delta l}{L} = 18 \cdot 10^{-3}(T - 20) \quad (36)$$

2.3.6.4 Massa específica

A massa específica é a relação entre a massa de um corpo sobre o volume que esse mesmo corpo ocupa. No concreto é influenciada pelo teor de água e de finos, pelos agregados utilizados e pelo índice de vazios (COSTA, 2008). Quanto menor a quantidade de água e teor de pasta na mistura maior será a massa específica. Essa grandeza ganha importância nos estudos térmicos devido a sua presença na equação de Fourier e sua variação com a temperatura do concreto.

Em temperatura ambiente a massa específica do concreto normal é normatizada em torno 2400 kg/m^3 e no caso do concreto armado como 2500 kg/m^3 , sendo conveniente o uso da primeira em análises puramente térmicas. Para temperaturas elevadas a massa do concreto endurecido sofre redução, causada principalmente pela evaporação da água livre, e de maneira secundária pelo aumento do volume devido à expansão térmica (COSTA, 2008).

De acordo com a ABNT NBR 15200:2012, a densidade do concreto pode ser definida em função da sua densidade aos 20°C $\rho(20^\circ\text{C})$ para direntes temperaturas como mostra a equação (37). De acordo com Costa (2008) na prática, para concretos convencionais os valores de redução de densidade observados não tem excedido valores da ordem de 100 kg/m^3 ou 120 kg/m^3 . Destaca ainda que a influência da variação de massa específica é baixa e influencia pouco os resultados das análises térmicas, podendo usar os valores de temperatura ambiente sem grandes prejuízos.

$$\begin{aligned} \rho(T) &= \rho(20^\circ\text{C}), & \text{se } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 115^\circ\text{C} \\ c(T) &= \rho(20^\circ\text{C})(1 - 0,02(T - 115)/85), & \text{se } 115^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ c(T) &= \rho(20^\circ\text{C})(0,98 - 0,03(T - 200)/200), & \text{se } 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ c(T) &= \rho(20^\circ\text{C})(0,95 - 0,07(T - 400)/800), & \text{se } 400^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (37)$$

2.3.6.5 Influência do aço

Quando se considera o concreto armado é conveniente levar em conta que o aço influencia as propriedades do todo com base nas suas propriedades térmicas. A condutividade térmica do aço é da ordem de $51,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, o calor específico é $486 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, o coeficiente de dilatação térmica varia entre $11,7\cdot 10^{-6}/\text{K}$ e $12,3\cdot 10^{-6}/\text{K}$ e a massa específica é 7850 kg/m^3 . Esses valores são válidos para temperaturas em torno da ambiente e foram extraídos de Callister (2008) tendo como referência as principais ligas de aço.

Com relação ao concreto é possível observar que o calor específico do aço é inferior, a dilatação térmica é da mesma ordem de grandeza e a massa específica e condutividade térmica são bem maiores. Entretanto existe ao longo da história uma tendência de desprezar o efeito do aço nos estudos térmicos. Em geral fugindo do aumento de complexidade do problema, alegando que área de aço em estruturas convencionais é muito baixa, sugerindo que sua contribuição pode ser negociada sem grandes prejuízos.

Os autores Azenha (2009) e Hilaire (2014) compararam por meio de simulação numérica pelo método dos elementos finitos as variações de temperatura de elementos de concreto nas primeiras idades com e sem consideração da presença de aço. Ambos concluíram que as variações máximas ocorrem no instante em que o concreto experimenta a temperatura máxima, mas ainda assim o erro é baixo. Sugerem então que a análise térmica pode ser feita desprezando este fator sem interferência significativa nos resultados.

2.3.7 Resistência Mecânica do concreto endurecido

Leonhardt e Möning (1977) destacaram que até então não se tinha muito estudo sobre as alterações das propriedades do concreto endurecido em situações de temperaturas extremas. Mas já se sabia que a resistência à compressão do concreto aumenta com a redução de temperatura e diminui com o aumento. Destacando a importância de estudar o assunto pois para cada extremo de temperatura existem casos reais que merecem atenção. No caso de alta temperatura destacaram os incêndios (até 1100°C) e os reatores nucleares em operação (até 500°C). Para baixas temperaturas os tanques de gás feitos em concreto envolvendo recipientes metálicos que podem chegar a -200 °C.

Para temperaturas na faixa entre 0°C e -170°C, o Model Code (2013) indica o cálculo do ganho de resistência à compressão pela equação (38), em função da temperatura (T) em °C e da umidade (U) em porcentagem de massa. A umidade varia de 2% em ambientes cobertos até 6% sob exposição à chuva. O equacionamento vale para concretos convencionais e leves não tendo estudos suficientes sobre o concreto autoadensável, mas a publicação sugere que seja válido também, pelo fato de suas características não fugirem muito das dos outros. Para determinação do módulo de

elasticidade e resistência a tração é indicado o uso das equações convencionais usando o valor corrigido de f_{cm} .

$$\Delta f_{cm} = 12m \left[1 - \left(\frac{T + 170}{170} \right)^2 \right] \quad (38)$$

As variações de temperatura do ambiente ou cura a vapor influenciam as propriedades mecânicas do concreto. De acordo com Model Code (2013) em função da temperatura, na faixa entre 0°C e 80°C, é possível corrigir a resistência à compressão (equação (39)), à tração (equação (40)) e o módulo de elasticidade (equação (41)) do concreto. Esse equacionamento é válido para concretos de resistência normal e alta e de pesos normal e leve. Sendo recomendada a realização de ensaios para a obtenção de valores mais exatos.

$$f_{cm}(T) = f_{cm}(1,06 - 0,003T) \quad (39)$$

$$f_{ct,m}(T) = f_{ctm}(1,16 - 0,008T) \quad (40)$$

$$E_{ci}(T) = E_{ci}(1,06 - 0,003T) \quad (41)$$

As propriedades do concreto são fortemente afetadas pela influência de temperaturas superiores às ambientes. Se observa grandes mudanças na sua microestrutura durante uma exposição a altas temperaturas. Ocorre alteração em propriedades mecânicas e físicas em decorrência da interação entre a temperatura, umidade e propriedades mecânicas do material. A seguir será tratado o caso do concreto em situação de incêndio para exemplificar este caso.

2.3.7.1 Estruturas de concreto em situação de incêndio

Historicamente o concreto tem sido visto como um material com boas propriedades em situação de incêndio, por ser incombustível e bom isolante térmico, embora não perfeito. Segundo Silva *et al* (2008) inicialmente foi usado como revestimento para pilares de aço visando a proteção destes. Posteriormente sendo usado com função estrutural na forma de concreto armado, sendo recomendada a verificação de sua segurança em situação de incêndio.

Os principais efeitos observados no concreto em temperaturas elevadas são a deterioração das suas propriedades mecânicas, danos causados por deformações

térmicas e lascamento (KLEIN, 2011). O comportamento do concreto é complexo e instável durante o incêndio devido a mudança de sua microestrutura.

Para temperaturas em torno de 100 °C, ocorre evaporação da água livre e começa a evaporação da água combinada e aumento da porosidade. Para 300 °C se observa uma perda rápida de resistência mecânica para concretos de agregados silicosos. Em 400 °C se observa a dissociação do hidróxido de cálcio e despasivação da armadura. Entre 500 °C e 600 °C se observa o aumento da fluência e reações cristalográficas dos agregados. Em 700 °C dissociação do carbonato de cálcio e redução rápida da resistência mecânica para agregados calcários. Em 800 °C ocorre a perda total da água quimicamente combinada. Em 1200 °C o concreto inicia o processo de sinterização, que consiste em um processo de fusão parcial dos materiais (COSTA, 2008). É comum a análise de estruturas em situação de incêndio ou outros carregamentos térmicos por meio do método dos elementos finitos. O cálculo é dividido em duas etapas. A primeira destinada a resolver o problema térmico obtendo a temperatura em cada ponto da seção. E a segunda é destinada ao cálculo de tensões e deformações levando em conta as combinações de carregamentos, inclusive o térmico obtido na outra análise. A qualidade da análise dependerá do refinamento da modelagem em cada etapa através da definição de condições de contorno mais próximas da realidade.

Kumar e Kodur (2017) modelaram de maneira numérica pelo método dos elementos finitos usando o programa ANSYS o comportamento termo-mecânico de paredes de concreto armado expostas ao fogo. O modelo considerou parâmetros críticos de índice de esbelte, e propriedades dependentes da temperatura para aço e concreto. O modelo consistiu em uma análise térmica transiente para determinar a distribuição de temperatura. Foi considerada a aplicação da temperatura de incêndio na face exposta ao fogo e perdas de calor por convecção e condução nas demais faces, obtendo uma distribuição de temperatura para toda a peça. Essa temperatura foi lançada no modelo de análise estrutural como carregamento térmico. Os valores de tensão e deformação obtidos foram comparados com modelos experimentais demonstrando boa correlação.

De acordo com Klein (2011), a forma mais avançada e próxima do real de determinação de temperaturas em cada ponto de um elemento estrutural é o modelo multizona ou dinâmica dos fluidos computacionais (*computational fluid dynamics* –

CFD). Nesse caso se resolve o problema por método dos elementos finitos usando as equações de conservação de energia e massa levando em conta que o ar é um fluido e o calor será transportado por ele dentro do ambiente em análise. Mas devido a sua dificuldade de implantação e necessidade de conhecimentos avançados para interpretação dos resultados fica restrito ao uso em pesquisas, não tendo viabilidade para uso em projetos práticos.

2.4 Método dos elementos finitos

Análises numéricas são técnicas que contam com ferramentas capazes de resolver de forma exata ou aproximada problemas matemáticos complexos que se fossem resolvidos de forma analítica seriam extremamente complicados ou impossíveis. Essas técnicas podem ser usadas para encontrar zeros de funções, resolver sistemas, ajustar e interpolar curvas, resolver integrais e equações diferenciais. Por isso é de grande importância nas ciências aplicadas para a solução de problemas práticos.

Com justificativa da vantagem desse método, para o caso das análises de tensões e deformações de estruturas, utilizando técnicas clássicas de solução analítica conclui-se que estas são aplicáveis apenas a geometria simples, não cobrindo boa parte dos problemas reais. Pois para geometrias mais complexas, os cálculos se tornam difíceis ou mesmo impossíveis de serem feitos pelo método analítico. O mesmo vale para problemas de transferência de calor, eletromagnetismo entre outros modelos físicos úteis para solucionar problemas de engenharia no cotidiano.

A disponibilidade de computadores de alta velocidade e de poderosos programas para programação e resolução de problemas matemáticos torna viável o cálculo numérico sendo visível seu impacto na prática da engenharia nos últimos anos. Existem várias maneiras de se obter a formulação numérica de um problema. Destaca-se o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos que são usados na prática.

O método das diferenças finitas é uma técnica usada para a resolução de equações diferenciais que se baseia na aproximação das derivadas por diferenças finitas. O método dos elementos finitos consiste em dividir o problema em inúmeras partes menores de modo que cada parte se comporte de maneira análoga a um elemento infinitesimal, mas com dimensões mensuráveis, o que leva a uma aproximação dos resultados do modelo analítico podendo atingir erros muito baixos.

Esse último método tem se tornado muito popular para aplicações práticas devido aos avançados programas comerciais de fácil operação disponíveis no mercado e a grande quantidade de pesquisas que comparam seus resultados com análises experimentais e que geralmente confirmam a boa aproximação do modelo.

2.4.1 Aplicação

Para analisar as variáveis de interesse em uma geometria complexa, uma técnica é dividir o seu volume em um conjunto finito de elementos contíguos e discretos e resolver um conjunto de equações para cada elemento e cada nó capazes de conectar os elementos entre si e oferecer como saída respostas para a geometria como um todo. Este é o conceito de Método Dos Elementos Finitos (MEF), que embora simples de enunciar seu grande problema é a complexidade e o volume de cálculos que devem ser feitos.

O MEF tornou-se relativamente fácil de aplicar, devido a evolução da capacidade de processamento dos computadores e a disponibilidade de programas comerciais de análise, muitos dos quais têm interface com diversos programas de modelagem de desenho. A utilização de programas comerciais facilita a obtenção de resultados de análises pelo MEF, mas o usuário deve compreender muito bem como utilizar esta ferramenta e os conceitos por trás das análises, para evitar erros grosseiros e os resultados se mostrarem significativos e próximos a realidade.

A resolução dos problemas pelo MEF usando um programa comercial segue uma ordem lógica. Inicia-se com a modelagem geométrica do problema, na sequência divide-se a geometria em uma malha de elementos, define as condições de contorno do problema, executa o processamento dos dados e coleta os resultados obtidos.

Os elementos podem ser de uma, duas ou três dimensões tratados como, elementos de linha, superfície e volume, respectivamente. A escolha de cada um deles depende da característica do problema a modelar. Os elementos de superfície podem ser triangulares ou quadriláteros, e os de volume podem ser tetraedros ou hexaedros. Cada nó dos elementos podem apresentar 1, 2, 3 ou 6 graus de liberdade com possibilidade de variação de propriedades como consequência das condições de contorno. Os elementos mais complexos são hexaedros com nós intermediários em cada aresta totalizando 20 nós.

Sobre a malha quanto maior a quantidade de elementos maior tende a ser a precisão dos resultados, mas acarreta em um grande aumento de tempo computacional. O grande dilema neste caso é o equilíbrio entre a acurácia dos resultados e o tempo de análise que se resolve por meio da definição de uma malha intermediária. Dependendo do caso e da capacidade de processamento do computador podem ser consumidas horas ou dias para resolver problemas relativamente simples. Para a produção da malha os programas comerciais possuem módulo automático para criação com base em definições de tipo de elemento, quantidade e tamanho.

A definição de condições de contorno são as restrições que se aplica em um componente. É uma tarefa complexa e pode conduzir a uma solução razoável ou ruim para o problema. Primeiramente devem ser fornecidas em número suficiente para que se permita calcular a peça. No caso de uma análise estrutural se o sistema for hipostático o processamento falhará. Quanto a sutileza das decisões, por exemplo, quando se especifica que um nó não pode se mover ele será calculado com uma rigidez infinita mas na realidade uma restrição física não apresentará essa rigidez.

O processamento dos dados consiste em resolver as equações que regem o fenômeno analisado para cada nó de todos os elementos. Para isso o problema é montado em forma matricial e assim resolvido. Para resolução das equações diferenciais que regem o fenômeno são utilizados métodos numéricos para a obtenção dos resultados.

Os principais programas que utilizam o MEF e aparecem em publicações relacionadas a estruturas são o ABACUS e o ANSYS. Outros recursos computacionais mundialmente conhecidos são o Nastran, Diana e o SAP2000. É possível também resolver estes problemas usando o ambiente MATLAB. Entretanto neste caso é exigido a entrada de todas as informações de condições de contorno e matrizes dos elementos além de programação de todas as etapas de cálculo de maneira manual.

2.4.2 MEF aplicado a análise térmica

As análises de Transferência de Calor pelo MEF possuem solução tipicamente rápida, e com baixo esforço computacional. Isso ocorre pois os elementos possuem um único grau de liberdade por nó, que é a temperatura. Além disso, resultados de boa qualidade podem ser obtidos mesmo com malhas mais grosseiras, devido ao comportamento linear da condução e pelo fato dos elementos não se deformarem em

uma análise exclusivamente térmica. Este tipo de análise é adequado para o tratamento da transferência por condução, ficando a convecção e radiação limitadas a serem condições de contorno.

Para resolver problemas de análise térmica, o que se deve fazer é integrar os dois lados da equação (42) sobre o volume de controle considerado. Esta equação nada mais é que uma forma de representação tridimensional da lei da conservação de energia com a substituição do termo relativo ao fluxo de calor pela lei de Fourier. Os termos desta equação são os mesmos da equação (25), com a diferença que a condutividade térmica ganhou índices para cada direção x,y e z, não precisando mais ser igual em todas as direções. Já o termo v_i é a velocidade do transporte de calor em cada uma das direções do plano cartesiano para $i=(x,y,z)$. O cálculo é feito de maneira aproximada usando como ponto de partida as condições de contorno fornecidas para o problema, conseguindo se obter a temperatura em cada nó (ANSYS 2004).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e} = \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (42)$$

Nas análises térmicas tridimensionais com o programa ANSYS os elementos *SOLID70* e *SOLID90* se mostram adequados para modelagem deste tipo de estrutura. Ambos apresentam um grau de liberdade por nó representado pela temperatura. A diferença é que o primeiro elemento possui 8 nós, se mostrando adequado para uso em geometrias gerais e o segundo 20 nós, se mostrando adequado para geometrias irregulares.

É comum o uso do *SOLID70* na modelagem de estruturas para a fase de análise térmica. Rigobello *et al* (2010) usaram este elemento para representação numérica de um perfil de aço, de uma laje de concreto e de uma alvenaria na análise térmica que realizaram. Kumar e Kodur (2017) usaram este elemento para modelar muros de concreto expostos ao fogo. Em todos os casos foram obtidos como resultados os valores de temperatura em cada nó dos elementos para posterior aplicação no modelo estrutural.

2.4.3 MEF aplicado a análise de estruturas

Este módulo pode ser usado para análise de estruturas estáticas e dinâmicas, mas esta análise ficará restrita ao primeiro caso, que consiste em considerar que ao realizar a somatória das forças resultantes o resultado é nulo, não existindo

aceleração, de acordo com a segunda lei de Newton. Nos problemas estáticos o que se busca é a obtenção de tensões, deformações e deslocamentos causadas por efeitos externos como forças, pressões, momentos, deslocamentos e temperaturas. Nestes problemas os nós possuem até 6 graus de liberdade, que são o deslocamento e o giro em relação a cada um dos três eixos que definem o espaço.

No programa ANSYS os problemas são resolvidos buscando o equilíbrio das equações (43) até (48) (ANSYS 2004). Elas relacionam as deformações totais na direção de cada eixo ou plano do sistema cartesiano global com a deformação de origem térmica e a elástica causada pelas tensões. Esse equacionamento é escrito para todos os elementos em forma matricial, sendo possível obter as incógnitas com base nas condições de contorno definidas de início. As variáveis deste equacionamento sofrem mudanças de forma de cálculo de acordo com o tipo de características do material, como isotropia, ortotropia, anisotropia e falta de linearidade das propriedades dos materiais. Sendo necessário uso de métodos iterativos de cálculo.

$$\varepsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy} \sigma_y}{E_x} - \frac{\nu_{xz} \sigma_z}{E_x} \quad (43)$$

$$\varepsilon_y = \alpha_y \Delta T - \frac{\nu_{xy} \sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{yz} \sigma_z}{E_y} \quad (44)$$

$$\varepsilon_z = \alpha_z \Delta T - \frac{\nu_{xz} \sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy} \sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z} \quad (45)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}} \quad (46)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}} \quad (47)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G_{xz}} \quad (48)$$

No equacionamento do ANSYS, ε_i , α_i , σ_i , E_i , são a deformação total, o coeficiente de dilatação térmica, a tensão normal, e o módulo de elasticidade do material analisado em cada direção i respectivamente. Onde i é cada um dos eixos globais considerados. As variáveis ε_{ij} , σ_{ij} , G_{ij} , ν_{ij} são a deformação de cisalhamento, tensão de cisalhamento, módulo de elasticidade transversal, e coeficiente de Poisson relativos ao plano com normal na direção i e paralelo à direção j Onde i e j são cada um dos eixos globais

considerados. Por fim ΔT é a variação de temperatura em relação à temperatura de referência, uma condição de contorno indispensável para a análise das deformações térmicas.

Como o concreto é um material com propriedades complexas, como módulo de elasticidade variável, resistência a tração diferente da à compressão, e geralmente possuir armaduras internas, foi criado um tipo de elemento para representar o concreto. Trata-se do *SOLID65*, um elemento tridimensional com 8 nós, que pode representar o concreto como um material isotrópico com até 4 tipos diferentes de reforços lineares em seu interior. É possível também definir a resistência a tração e compressão do concreto e levar em conta o efeito da fissuração ocorrida por superar a resistência do material e calcular a redistribuição de tensões desconsiderando estas perdas de capacidade. É possível também modelar as deformações plásticas e a fluência.

No trabalho de Kumar e Kodur (2017) o concreto foi modelado usando o *SOLID65*, entretanto o aço não foi definido como um reforço do próprio elemento, mas sim um elemento linear de 2 nós que resiste apenas a tensões normais, o *LINK180*. Tal medida é tomada pois o reforço do elemento de concreto é definido como uma porcentagem de área da seção da peça não tendo um local fixo. Então quando é necessário o conhecimento da posição exata do aço ele deve ser modelado separadamente.

3 ANÁLISE DE CASO

3.1 Análises realizadas

Neste trabalho foi analisado por meio de simulação numérica pelo método dos elementos finitos o efeito de casos de variação de temperatura em uma estrutura específica. A modelagem se restringiu à estrutura de concreto destinada a receber um acelerador linear destinado a tratamentos radioterápicos. Tal estrutura se encontra construída no Hospital do Câncer de Uberlândia. Sendo útil estudo tendo em vista a possibilidade de se replicar tal estrutura no futuro.

As análises realizadas buscaram entender os efeitos mecânicos expressos em forma de tensões e deformações advindos de carregamentos térmicos. Sendo estudada exclusivamente a evolução do calor de hidratação do concreto e o risco de ocorrer fissuras na estrutura devido a variação térmica observada. Para uma maior

proximidade com a realidade tentou-se simular as técnicas e etapas construtivas mais prováveis a se seguir. Considerou-se também condições ambientais favoráveis.

3.1.1 Acelerador linear

O acelerador linear é um dispositivo utilizado dentro do tratamento de radioterapia, que tem como função emitir a radiação utilizada em diversos procedimentos médicos. As radiações emitidas por ele são os raios x de alta energia ou elétrons acelerados (partícula beta) e ambos são provenientes do processo de conversão de energia elétrica em energia radiante (BRASIL ESCOLA, 2018).

A radiação independente de ser produzida pelo homem ou de origem natural representa risco para os organismos biológicos. Baixos valores são toleráveis pelo organismo, mas após certas doses as células começam a ser afetadas. De acordo com Trapp e Kron (2008) inicialmente ela contribui para a formação de radicais que agem na célula resultando em uma interferência indireta. Com um aumento, seu efeito passa a ser direto, causando lesões no DNA, mas que o organismo consegue reparar. Aumentando ainda mais a dosagem, ocorre prejuízo nos processos de reparo e mitose, causa apoptose e o dano atinge órgãos formando elementos cancerígenos.

O acelerador linear tem a função de aproveitar a capacidade da radiação em danificar células direcionando esse efeito para células doentes no tratamento do câncer. Em relação aos pacientes a intensidade de radiação que os tecidos saudáveis estão expostos não é tão maléfica devido à intensidade controlada, direcionamento da radiação, tempo de exposição e os benefícios do tratamento serem superiores aos males causados. Entretanto para os profissionais que operam o equipamento, moram ou transitam perto do ambiente, devido ao longo período de contato com a radiação, se não houver medidas preventivas podem ter seus organismos gravemente prejudicados pelo efeito.

Nesse sentido cabe aos físicos e profissionais de engenharia desenvolver medidas que busquem reduzir tempo de contato, distância das fontes de radiação e criar elementos de blindagem de seus efeitos. O tempo de exposição é diretamente proporcional à dose recebida. Para os aceleradores lineares, normalmente não há opção de reduzir o tempo de exposição sem prejuízo nos resultados. Deve-se nesse caso controlar distância e blindagem (TRAPP; KRON, 2008).

O concreto é usado para blindagem biológica em usinas nucleares, unidades médicas e instalações de pesquisa e testes atômicos por ser o mais econômico para construção e manutenção. Além disso é um excelente material de proteção que possui as características necessárias tanto para a atenuação de nêutrons como de raios gama. Também soma-se a isso a facilidade de construção em formas diversas dando origem a estruturas monolíticas (MEHTA; MONTEIRO,2006).

Para o *bunker* dos aceleradores lineares são feitos fechamentos maciços de concreto convencional ou concreto com agregado pesado quando a disponibilidade de espaço é reduzida. Os agregados pesados fazem com que a eficiência do concreto aumente podendo usar peças menos espeças. Devido à espessura, o efeito do gradiente térmico durante o resfriamento do concreto pode resultar em fissuras. De acordo com Mehta e Monteiro (2006) as tensões podem ser calculadas considerando a tensão obtida com base na dilatação térmica do concreto, tendo uma pequena redução de valor causada pela relaxação da fluência.

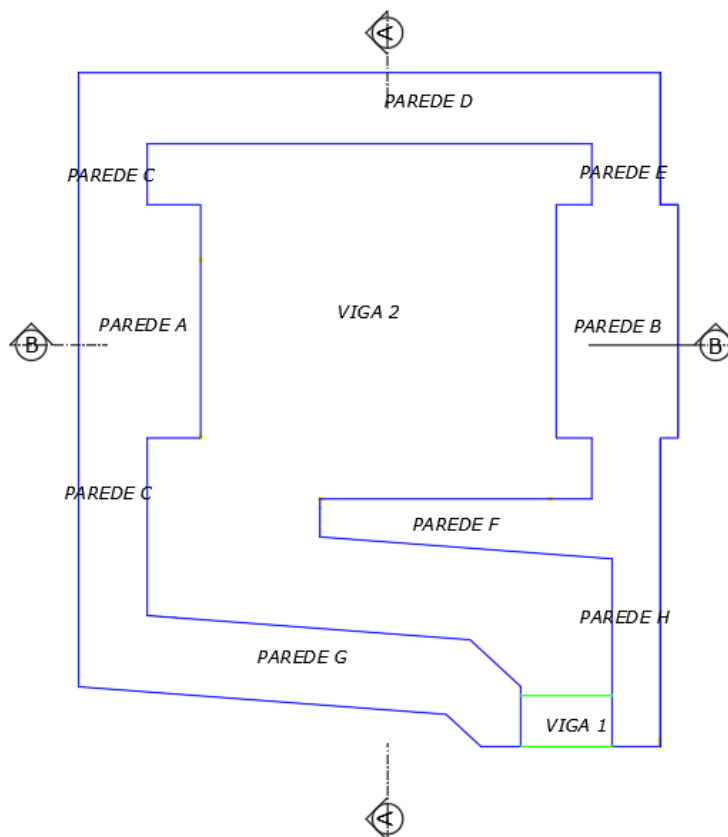
Como a função destas estruturas é funcionar como barreira, as fissuras são bastante prejudiciais do ponto de vista da eficiência do sistema. Então devem ser tomadas medidas para evitá-las. As principais têm sido reduzir o calor de hidratação do concreto para reduzir o gradiente térmico e conseqüentemente as tensões e fissuras.

Tendo em vista a importância da problemática apresentada, este trabalho busca simular o comportamento da estrutura durante a fase de hidratação. Onde se busca entender melhor o seu comportamento e fornecer sugestões de medidas que podem ser tomadas para garantir o correto dimensionamento e otimizar o projeto do ponto de vista de custo.

3.2 Características da estrutura analisada

A estrutura analisada trata-se de um *bunker* com a forma da Figura 7, que pode ser visto com mais detalhes nos cortes apresentados na Figura 8 e na Figura 9. Ele é completamente feito em concreto armado. Os desenhos que estiveram disponíveis para a realização deste trabalho estão no Anexo A. Nele os detalhes, as dimensões, assim como o projeto de locação das estacas podem ser melhor observados e compreendidos.

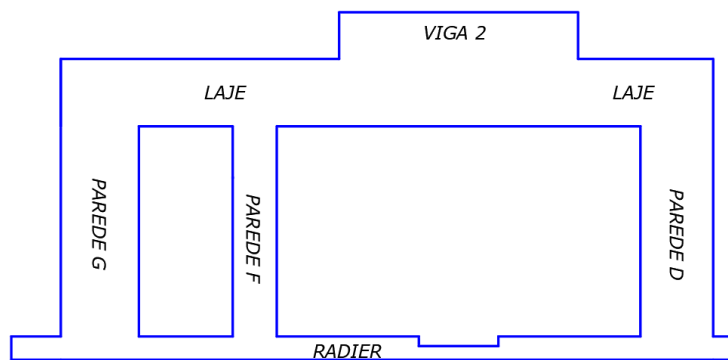
Figura 7 – Planta de forma das paredes



Fonte: Autor (2018).

A fundação trata-se de um radier cuja espessura é 45 cm apoiado sobre estacas. As paredes têm espessuras diversas com base na intensidade da radiação que cada uma recebe, sendo as mais espessas as paredes A e B, com espessura de 240 cm e a menos espessa a parede H com 95 cm. Sobre as paredes se apoia uma laje maciça de espessura de 130 cm, e no alinhamento das paredes A e B esse elemento é mais espesso, sendo chamado de viga 2, que eleva a espessura da camada sobre essa região em mais 90 cm totalizando 220 cm.

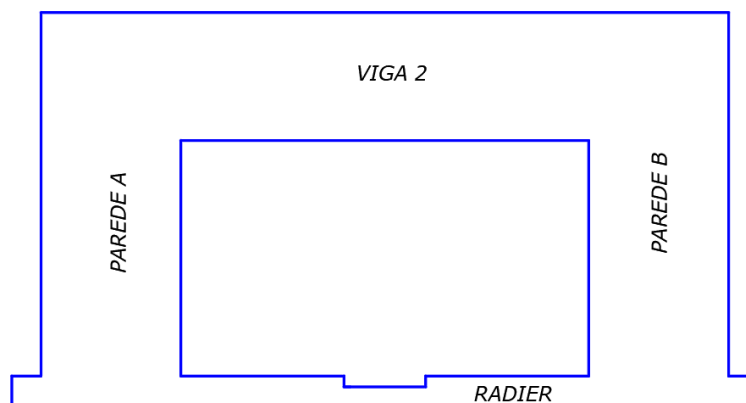
Figura 8 – Corte AA



Fonte: Autor (2018).

As únicas aberturas são uma porta e um vão acima desta entre a laje e a viga 1. A abertura da porta é de 180 cm de largura por 225 cm de altura, e a outra abertura destina a passagem de tubulações mede 180 cm de largura por 40 cm de altura. No radier existe um rebaixo destinado ao posicionamento do acelerador linear.

Figura 9 – Corte BB



Fonte: Autor (2018).

3.3 Análises numéricas

Neste trabalho visando entender o comportamento da variação de temperatura e seus efeitos foi utilizado o MEF para a realização da análise numérica das tensões e deformações causadas por essa grandeza. Utilizou-se o programa ANSYS por este estar disponível na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV-UFU). O trabalho foi desenvolvido no ambiente clássico, conhecido por Mechanical APDL utilizando os recursos de análise térmica e de análise estrutural.

Os problemas foram divididos em duas etapas. A primeira foi a análise térmica transiente destinada a obter a temperatura em cada nó da estrutura ao longo do tempo e a segunda, a análise estrutural, que contava com os resultados da análise anterior como fonte para definição das condições de contorno de carregamento térmico.

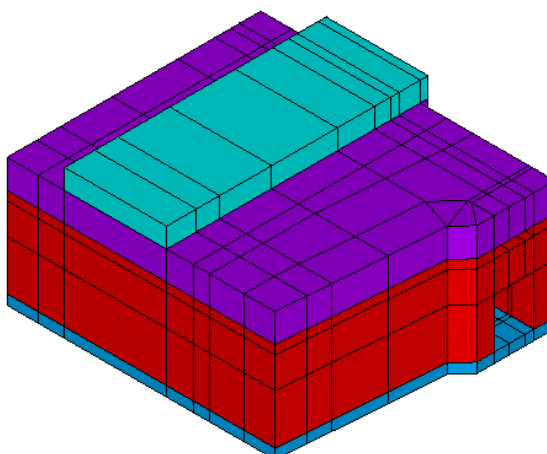
3.3.1 Modelo Construído

Para simular a estrutura, a primeira fase foi criar um modelo tridimensional. Para isso foi usado um programa de modelagem gráfica. O que se fez foi partir das plantas, cortes e detalhes disponíveis e criar o modelo em um formato de arquivo que o ANSYS fosse capaz de reconhecer. Como a estrutura tem uma forma irregular, nesta etapa tomou-se o cuidado de dividir o modelo em uma grande quantidade de sólidos para

garantir que quando fosse gerada a malha elementos adjacentes compartilhassem o mesmo nó sempre. Tal cuidado é importante para refinar o resultado.

A Figura 10 mostra o modelo criado para o *bunker*, destacando em tonalidades diferentes seu radier, suas paredes, sua laje e sua viga. Além desses sólidos foi criado um elemento em forma prismática sob o radier para representar o solo do local. Tal elemento foi criado pois durante a análise térmica a perda de calor para o solo é uma variável importante a se considerar. A dimensão do elemento de solo foi definida grande o bastante para que durante o tempo de análise o calor não deslocasse até suas bordas laterais ou inferior, garantindo assim o comportamento de um elemento semi infinito, característica do solo real. Em relação às estacas, nada foi considerado durante a modelagem, e elas foram tratadas como condições de contorno.

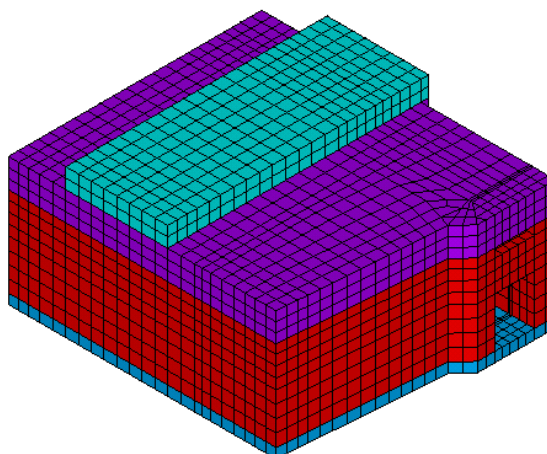
Figura 10 – Modelagem 3D dividida composta pela união de diversos sólidos



Fonte: Autor (2018).

Uma vez lançado no ambiente do ANSYS foi criada a malha do modelo. A malha definida foi única para todas as análises realizadas. Sendo variado apenas o tipo de elemento e suas propriedades em cada caso. Ela foi criada para todos os volumes definindo os elementos para a forma de hexaedro, e limitando a área de cada um deles a $0,30 \text{ m}^2$. Tal limitação foi escolhida após testar valores maiores e menores e se concluir que se mostrava a mais equilibrada. Com ela se obteve uma uniformidade razoável nas dimensões dos elementos como pode ser visto na Figura 11. Além disso tal quantidade de elementos não demandou tempo de análise excessivo. Ao término da geração, todos os elementos foram unidos para que o elemento se comportasse como uma estrutura monolítica.

Figura 11 – Malha usada na modelagem



Fonte: Autor (2018).

Nesta modelagem não foram atribuídas informações para o aço que existe no concreto armado. De acordo com Azenha (2009) ele ter pouca influência nos resultados térmicos e torna a modelagem mais complexa. Além disso um dos objetivos do trabalho é prever os locais e quando o concreto “sozinho” não consegue resistir as tensões de tração e exige a presença de armadura.

3.4 Efeitos do calor de hidratação na estrutura

Esta análise foi realizada buscando entender como se dá a variação e os efeitos da temperatura gerada exclusivamente pela hidratação do concreto durante o primeiro mês de cada elemento construtivo que compõe a superestrutura do *bunker*. Preocupou-se em buscar proximidade a um cronograma provável a ser seguido em uma situação real para este tipo de obra.

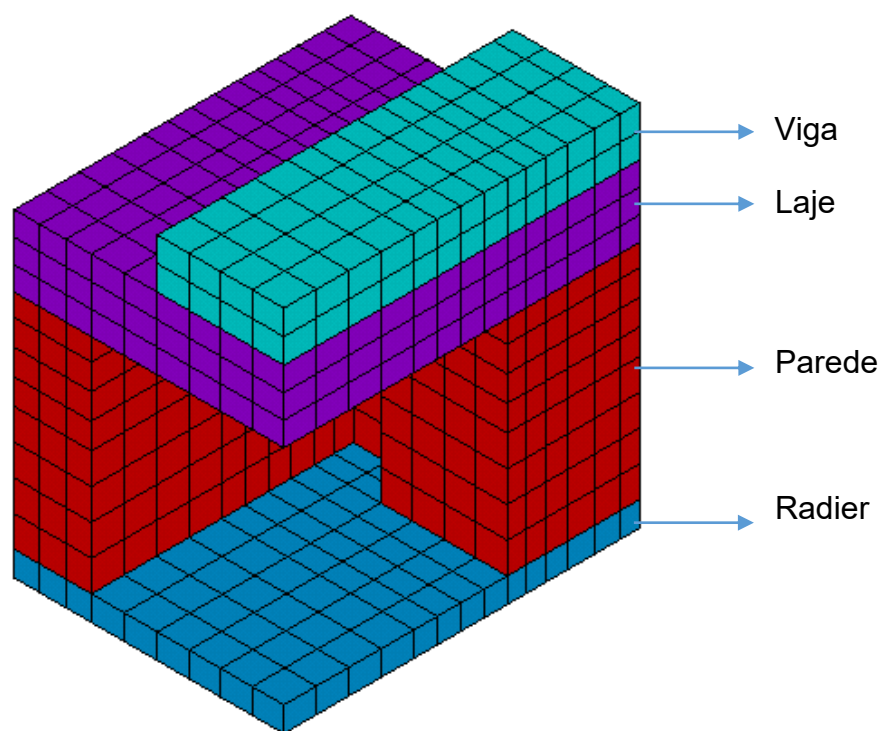
Como a execução desta estrutura demanda um grande volume de concreto e o concreto é fluido, se torna muito complicado executar toda a ela em uma única etapa conseguindo estanqueidade e evitando juntas frias. Tendo isto em vista, considerou-se que inicialmente foi concretado o radier. Depois que este já tinha atingido seu f_{ck} , e não mais gerava calor a uma taxa considerável, ocorreu a concretagem das paredes. Considerou-se que esse tempo foi usado para montagem e posicionamento de fôrmas e armaduras. Da mesma forma, considerou que a concretagem da laje ocorreu após a parede já possuir resistência compatível com seu f_{ck} . Na sequência foi realizada a concretagem da laje e feitas as mesmas considerações para a concretagem da viga.

Foi então analisado o efeito da geração de calor de cada elemento construtivo fresco sobre ele mesmo e os outros já anteriormente concretados. Para tanto realizou-se a

análise térmica para o primeiro mês decorrido após cada uma das quatro etapas de concretagem e análises estruturais dos efeitos destas temperaturas.

Para a análise dos resultados obtidos, devido à grande de informações geradas, buscou-se limitar o estudo a um quadrante da estrutura, para facilitar a interpretação dos resultados. Após o processamento do todo, a estrutura foi cortada restando as partes visíveis na Figura 12. Tal corte passa no centro da viga 2, e da parede B, a mais espessa da estrutura e no centro da parede D, além de passar por regiões aproximadamente centrais da laje e do radier. As análises feitas ficaram restritas às superfícies desta região. Nas análises térmicas o corte se estendeu à faixa de solo.

Figura 12 – Corte para restrição de análise de resultados



Fonte: Autor (2018).

3.4.1 Análise térmica

A análise realizada foi baseada nos estudos, análises e resultados de Azenha (2009), que estabeleceu parâmetros de entrada e formas de realização de análises numéricas do comportamento do concreto nas primeiras idades levando em consideração o efeito da temperatura gerada e a retração térmica e a causada pela perda de umidade. Uma das preocupações do autor era fornecer bases para simulação de estruturas reais. Ele inclusive exemplifica a modelagem de uma barragem de concreto e o bloco de fundação de uma torre eólica.

O trabalho aqui realizado ficou restrito à análise puramente térmica e seus efeitos. Segundo Azenha (2009), a perda de umidade nas superfícies em contato com fôrmas pode ser desprezada enquanto estas ainda estão presentes. Nas outras superfícies os efeitos da umidade podem ser reduzidos por uma cura eficiente que busque manter o elemento saturado. Garantindo essas condições os resultados aqui obtidos ficam próximos da realidade da representação total dos dois fenômenos.

3.4.1.1 Validação do modelo

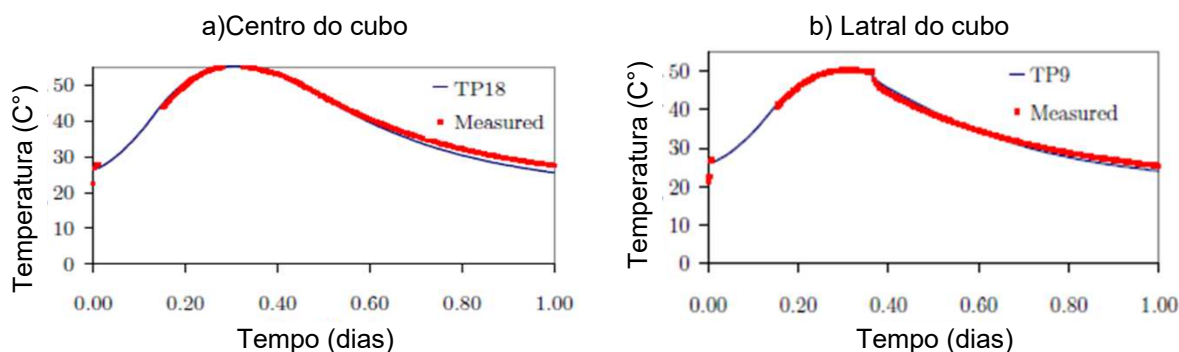
Antes de iniciar a modelagem proposta, para verificar se o programa usado estava calibrado, foi repetida uma modelagem presente no trabalho de Azenha (2009) para verificar se os resultados gerados estavam adequados. Trata-se da modelagem de um cubo de concreto de 40 cm de lado e verificação da sua variação de temperatura no primeiro dia. Tal elemento foi construído pelo autor de maneira real e simulação e os resultados obtidos foram comparados e se mostraram próximos.

Foi criada a mesma geometria e as mesmas condições de contorno, com exceção da taxa de geração de calor que foi obtida por método numérico pelo autor para uma temperatura inicial de 26 °C e neste trabalho foi obtida pela curva experimental de taxa de geração para o mesmo cimento com temperatura de 30 °C.

A Figura 13 mostra os resultados obtidos na análise realizada por Azenha (2009), seu resultado numérico (TP) e o resultado obtido por sensores no modelo real (Measured) são apresentados para o centro do cubo (a) e para uma das laterais (b). A Figura 14 apresenta os resultados aqui obtidos na repetição da análise com o ANSYS. Tanto os valores para o centro do cubo (a) e para uma das laterais (b) se mostraram próximos as valores esperados.

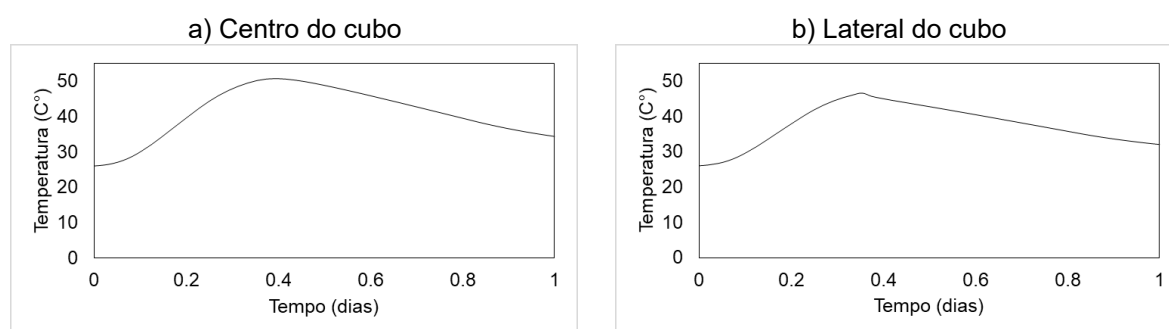
Destaca-se que essa etapa não funciona como uma validação propriamente dita para o modelo do *bunker*, pois para tal seria necessários dados específicos da estrutura para a definição das condições de contorno. Tais informações não estão disponíveis. Essa etapa funciona então apenas como uma validação do programa usado, que com base nos resultados apresentados, foi considerado adequado para a análise.

Figura 13 – Resultados de Azenha (2009)



Fonte: Azenha (2009).

Figura 14 – Resultados obtidos no ANSYS



Fonte: Autor (2018).

3.4.1.2 Geração de calor no concreto

Como já observado, em uma obra de grandes volumes de concreto é conveniente tomar medidas para redução do calor de hidratação. Por isso buscou-se adotar na modelagem um concreto que gera pouco calor. Quanto a temperatura inicial do concreto, o ideal é que também seja baixa. Por ser um valor de referência para a maior parte dos estudos de propriedades do concreto, adotou-se que a temperatura inicial do concreto é 20°C. Quanto ao consumo de cimento o ideal é que seja baixo. Neste caso buscou-se adotar um valor que se aproxima da média de consumo para obter resistências da ordem de 25 MPa, adotando o valor de 350 kg/m³ de concreto.

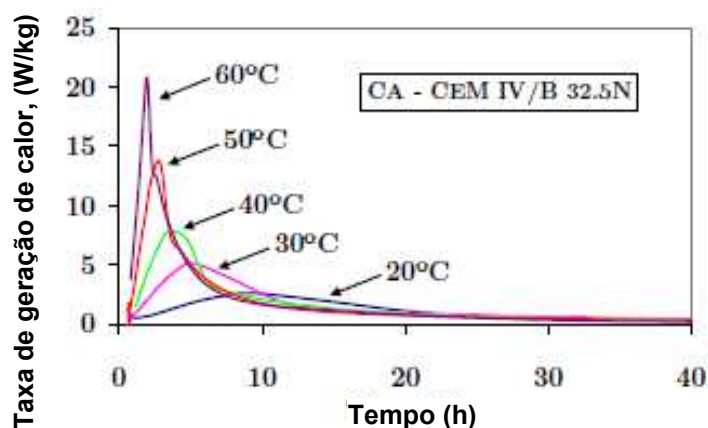
O cimento adotado para a análise foi aquele caracterizado por Azenha (2009) que possuía o menor calor de hidratação. Trata-se do cimento CEM IV 32.5 N, um cimento pozolânico padrão europeu, onde sua composição de clínquer varia entre 45% e 64%, de cinzas volantes siliciosas entre 36% e 55%. Suas propriedades mostram que ele é semelhante ao CP IV brasileiro. Optou-se por utilizar esse cimento, em função de todas suas propriedades necessárias já estarem definidas.

O cimento europeu é caracterizado por baixo calor de hidratação, progressão gradual da resistência durante vários meses, bom comportamento em ambientes agressivos

e elevada compacidade e impermeabilidade a idades avançadas. É indicado para uso em concretagem de grandes massas, em meios agressivos, trabalhos marítimos, como concreto simples de uso geral em fundações e elevações entre outros. Não é recomendado para uso em obras em que a estrada em serviço seja rápida (CIMPOR, 2018).

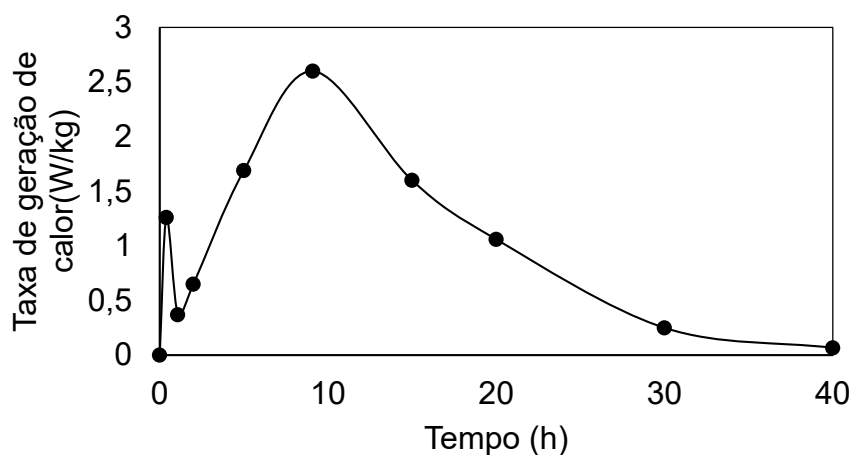
A Figura 15 mostra a taxa de geração de calor do CEM IV 32.5 N, para diferentes temperaturas de termoativação. O que foi feito para a obtenção da curva da taxa de geração de calor de interesse foi adotar a curva relativa a 20°C e obter os valores numéricos da taxa de geração de calor para este cimento para servirem de dados de entrada no ANSYS. A Figura 16 mostra a curva obtida. Como a análise foi feita para 30 dias de duração, para o restante do tempo após as primeiras 40 horas, a taxa de geração de calor foi tomada como se fosse decrescente linearmente partindo do ponto final do gráfico e cessando no trigésimo dia.

Figura 15 - Taxa de geração de calor do CEM IV 32.5 N



Fonte: Azenha (2009).

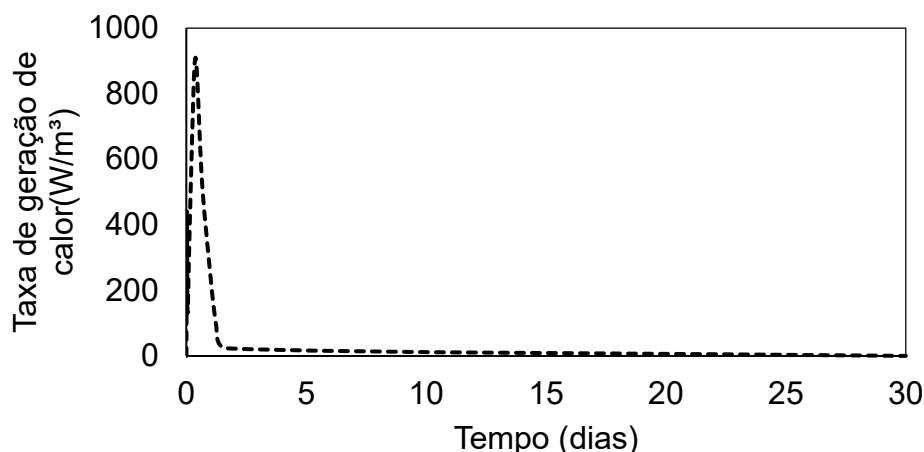
Figura 16 – Curva de taxa de geração de calor obtida para 20°C



Fonte: Autor (2018).

Como a curva é gerada para 1 kg de cimento, os valores obtidos devem ser corrigidos para a massa total de cimento em 1 m³ de concreto. Considerando um consumo de 350 kg, basta multiplicar cada ponto da curva por esse valor, e será obtida a taxa de geração de calor em W/m³, unidade necessária para a entrada de geração de calor no ANSYS. A curva de entrada pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Curva de taxa de geração de calor de entrada no ANSYS



Fonte: Autor (2018).

3.4.1.3 Materiais e propriedades

Para a modelagem o concreto e o solo foram definidos pelo elemento finito *SOLID70*. Foram criados dois diferentes materiais para possibilitar a definição de diferentes propriedades térmicas. Para a realização da análise foi necessário definir, o calor específico, a condutividade térmica e a densidade de cada material. Os valores de cada parâmetro foram considerados constantes com a variação de temperatura.

A condutividade térmica do concreto foi definida como 2,6 W/m·K por ter sido o valor usado por Azenha (2009) em suas análises e por ser um valor médio na faixa de valores possíveis para este parâmetro. O calor específico foi adotado como 1000 J/kg·K, por ser esse um valor recomendado para uso em análise simplificadas pela ABNT NBR 15200:2012. A densidade foi adotada como 2400 kg/m³ por ser um valor médio de consenso geral se relacionado ao peso do concreto simples de peso normal, presente em diferentes códigos e normas.

Para a definição das propriedades do solo foi usado como referência o trabalho de Duarte (2004). A condutividade térmica foi definida como 2 W/m·K. O calor específico foi adotado como 700 J/kg·K. A densidade foi adotada como 1700 kg/m³. A intensão era representar um solo como presença de umidade e composto de silte e argila.

3.4.1.4 Condições de contorno

As condições de contorno do problema foram a geração de calor interno, a perda de calor por convecção nas superfícies das peças, e a definição da temperatura de referência. A temperatura de referência pode ser entendida como a temperatura dos elementos no início da análise e foi tomada como 20°C.

Foram definidos dois coeficientes de convecção. Um deles para as superfícies do concreto, que independentemente de estar fresco ou não, estivessem expostas ao ambiente. O outro foi para as superfícies do concreto fresco que intuitivamente estariam enformadas, que são as laterais de cada elemento construtivo e o fundo da laje. O coeficiente usado na superfície livre foi apresentado por Azenha (2009) como sendo um valor combinado do efeito da radiação solar com o efeito convectivo de um ambiente com ventos insignificantes sendo adotado o valor de 10 W/m²· K. Este mesmo valor foi usado para a superfície do solo. Para as superfícies protegidas por fôrmas foi considerado o uso de uma fôrma de 18,5 mm de espessura e descontado seu efeito negativo à perda de calor para o ambiente devido a sua condutividade, adotando um coeficiente de 5,2W/m². Em todos os casos a temperatura de referência para a convecção foi a ambiente de 20°C.

Nesta etapa foram feitas quatro análises. A primeira simulava o período após a concretagem do radier, contando apenas com ele e o solo. O radier gerava calor com a intensidade já definida, tinha a superfície superior em contato com a atmosfera e tinha suas laterais enformadas durante toda a análise. Em sequência considerou o pós concretagem das paredes, considerando estas gerando calor, suas laterais enformadas e o radier curado, desformado e sem geração de calor. Da mesma forma procedeu à concretagem da laje considerando sua geração de calor e fôrmas laterais e no fundo e os demais elementos sem fôrmas e sem geração de calor. Por fim se deu a concretagem da viga considerando sua geração de calor e uso de fôrmas em suas laterais e os demais elementos sem fôrmas e sem geração de calor. Em todos os casos a ligação entre diferentes elementos permitia a troca de calor por condução sem nenhuma restrição. Destaca-se que o solo foi excluído das análises em que a geração de calor se dava na laje e na viga pois se observou que não ocorria variações de temperatura nele, e trouxe a vantagem de eliminar seu peso na análise computacional.

As análises realizadas foram do tipo transiente para que se pudesse coletar de maneira mais próxima da realidade as temperaturas de cada instante. Definiu-se a geração de resultados a cada 2 horas durante os 30 dias analisados. Este banco de resultados foi usado para a coleta de carregamento térmico para cada análise estrutural realizada.

3.4.2 Análise estrutural

As análises estruturais realizadas contaram apenas com os carregamentos térmicos, não sendo considerado peso próprio dos elementos, sobrecargas ou quaisquer outras ações. Todos os carregamentos térmicos usados vieram das análises de temperatura da etapa anterior. O modelo usado foi mantido sendo apenas acrescentadas as propriedades mecânicas dos materiais e mudado o tipo de elemento para um com características estruturais. Foi também acrescentado os apoios da estrutura para garantir sua condição estática.

3.4.2.1 Materiais e propriedades

As análises ficaram restritas ao concreto, através do uso do elemento finito *SOLID65*. Atribuiu-se ao concreto usado em todos os elementos o valor de f_{ck} de 25 MPa. O sólido que representava o solo foi excluído, e nada foi analisado sobre ele nesta fase. Foram criados diferentes materiais para possibilitar a definição das propriedades mecânicas para o concreto em diferentes idades. Definiu-se concretos com 3, 7 e 28 dias de idade. Além destas idades para cada elemento construtivo foi criado um modelo para a idade que se observou a temperatura máxima no corte analisado. No radier e na viga a temperatura máxima ocorreu em 1,08 dias, nas paredes em 2,08 dias e na laje em 1,25 dias.

Foi necessário atribuir os valores de módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, curva tensão-deformação, e coeficiente de dilatação térmica. O coeficiente de Poisson foi definido como constante e com valor de 0,20, por representar um valor adequado como já descrito anteriormente. O coeficiente de dilatação térmica também é constante e vale $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, tendo como temperatura de referência o valor de 20°C . Tal valor foi tomado seguindo a recomendação da ABNT NBR 6118:2014, e pelo fato da variação da temperatura não ser alta o bastante para justificar o uso do coeficiente corrigido para altas temperaturas. As curvas tensão-deformação e o módulo de elasticidade foram definidos em função da temperatura sendo ajustados pelas

equações apresentadas pelo Model Code (2013) para variações de temperatura entre 0°C e 80°C.

O valor de resistência à compressão em função da temperatura foi calculado pela equação (39) com uso do valor de f_{ckj} obtido na equação (4) no lugar da resistência média à compressão. O módulo de elasticidade usado foi o secante, considerando agregado do tipo granito obtido por uso das equações (8) e (9), e ajustado com base na idade pela equação (11). Os valores obtidos foram ainda corrigido para a temperatura pela equação (41). A curva tensão-deformação foi obtida dos valores de resistência à compressão corrigidos em função da temperatura através da entrada de seus valores na equação (13) desconsiderando a minoração de 0,85. Para deformações entre 2% e 3,5% a tensão foi atribuída como constante.

A resistência a tração também foi calculada, visando a comparação com os valores de tensão obtidos nas análises. Usou-se a equação (40) com entrada do $f_{ct,m}$ obtido do f_{ckj} pela equação (5) para cada idade analisada.

Com base nas equações foram tabelados valores para temperaturas de 20°C e 80°C para entrada no ANSYS. Para valores intermediários de temperatura o programa fez interpolação linear. Os valores de entrada no programa para o módulo de elasticidade podem ser observados na Tabela 7 assim como os valores de tensões de tração e compressão resistidos em tais temperaturas. As tabelas de entrada para as curvas tensão-deformação para as diferentes idades podem ser observadas no Anexo B.

3.4.2.2 Condições de contorno

As condições de contorno aplicadas foram o carregamento térmico e os apoios da estrutura.

O carregamento térmico era aplicado através do acesso ao arquivo de resultados de temperaturas em cada ponto da análise anterior informando o instante de interesse em se obter os valores. Dessa forma todos os nós da estrutura eram carregados para as diferentes idades de análises.

Em relação aos apoios, a translação foi restrita em todas as direções em todos os nós da face inferior do radier. Dessa forma o *bunker* se comporta como se fosse engastado. Tal definição se mostra próxima da realidade pois através da observação da planta de locação das estacas, presente no Anexo A, percebe-se que a grande

quantidade delas fornece resistência aos movimentos horizontais e verticais da estruturas.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas para entrada no ANSYS de acordo com a idade do concreto

Idade (dias)	Temp. (°C)	f_{ckj} (MPa)	$f_{ct,m}$ (MPa)	E_{cs} (MPa)
28	20	25.00	2.56	24150.00
	80	20.50	1.33	19803.00
7	20	17.10	1.99	21054.39
	80	14.02	1.04	17264.60
3	20	11.45	1.52	18355.70
	80	9.39	0.79	15051.67
2.08	20	9.08	1.31	16998.10
	80	7.44	0.68	13938.44
1.25	20	6.05	1.00	14913.25
	80	4.96	0.52	12228.87
1.08	20	5.30	0.91	14295.01
	80	4.34	0.47	11721.90

Fonte: Autor (2018).

Nesta etapa foram feitas 16 análises, divididas em 4 grupos com 4 análises cada. Cada grupo diz respeito ao estado fresco de um dos elementos construtivos (radier, parede, laje e viga). E cada análise às idades de 3 dias, 7 dias, 28 dias e instante do máximo valor de temperatura observado no elemento que está se hidratando.

Para o grupo do radier, aproveitou-se o modelo da análise térmica do seu primeiro mês, trocando o tipo de elemento de térmico para estrutural. Na primeira análise foram

definidas as propriedades mecânicas do concreto fresco com 1,08 dias, o carregamento térmico da análise da etapa anterior para o radier correspondente a essa idade e o engastamento. O carregamento foi dividido em 10 passos para que em caso do material falhar pudesse ser conhecidos os valores das últimas tensões resistidas. As outras análises do radier seguiram o mesmo procedimento, apenas com a mudança das propriedades dos materiais e do carregamento térmico para a idade estudada.

Para os grupos relativos ao estado fresco de paredes, laje e viga, o procedimento foi análogo. Com a diferença que os elementos concretados em etapa anterior contaram com propriedades mecânicas do concreto endurecido com 28 dias enquanto apenas o elemento fresco sofria variações de propriedades mecânicas na mudança de análise.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Efeitos do calor de hidratação na estrutura

As análises realizadas possibilitaram a observação das variações de temperatura ao longo do tempo e sua distribuição no *bunker*. A coleta de tensões e deformações causadas por essa grandeza possibilitou a identificação das regiões mais propensas a enfrentar problemas advindos de efeitos térmicos. Dando base para compreender os cuidados que devem ser tomados durante o projeto e a execução de uma estrutura deste tipo.

4.1.1 Análise térmica

A análise térmica foi destinada a produção de valores de temperatura para entrada na análise estrutural. Mas a observação da distribuição de temperatura nos elementos ajuda a compreender melhor o comportamento das tensões e deformações que se esperam.

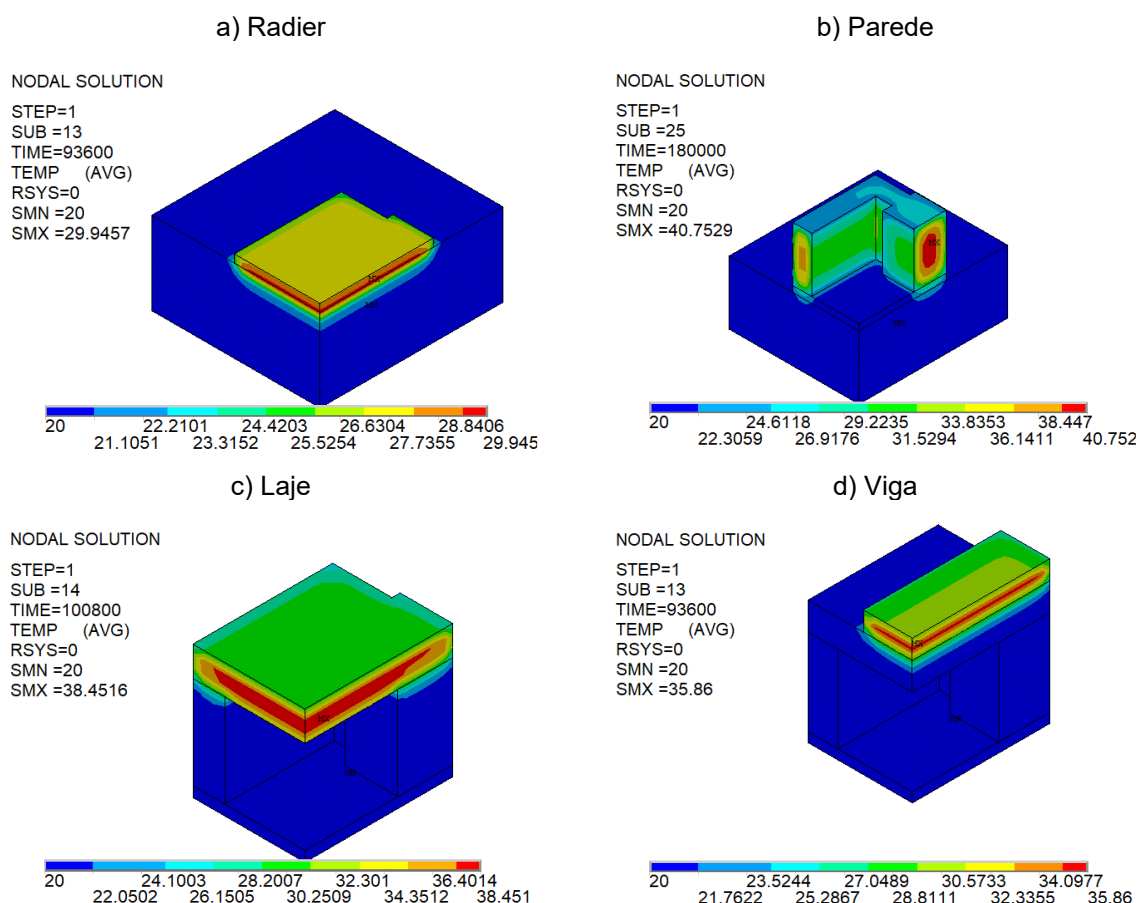
Devido à perda de calor por convecção nas superfícies, embora a geração seja igual em todos os pontos, acaba se formando gradientes térmicos. Dessa forma no concreto fresco se observa temperaturas mais baixas próximas às superfícies que perdem calor e maiores em seu interior.

Em relação aos elementos de concretos que já estão endurecidos, portanto sem geração de calor, percebeu-se que a energia térmica migra para eles vinda do

concreto fresco por contato podendo atingir temperaturas altas o bastante para gerarem tensões consideráveis. O mesmo vale para o solo. Já os elementos que estão sem contato com o elemento gerador de calor não sofrem variações de temperatura ou sofrem valores desprezíveis em consequência do transporte por condução pelos elementos que se tem entre eles.

Considerando o quadrante analisado percebeu-se que os valores máximos de temperatura causados pela hidratação de cada elemento ocorrem com valores e idades diferentes. A Figura 18 mostra a distribuição de temperatura no instante em que cada elemento experimenta seus valores mais altos de temperatura. No radier (a) a temperatura máxima ocorre próximo a sua face inferior na região central da peça. Nas paredes (b) é observada na região central da parede mais espessa. Para a laje (c) e a viga (d) ocorrem na metade da altura do elemento e na sua área central.

Figura 18 – Temperaturas máximas observadas em cada elemento em °C



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 8 apresenta de maneira resumida os valores de tempos e temperaturas presentes na Figura 18. A temperatura máxima ocorre na parede, que é o elemento mais espesso e a menor no radier, o de menor espessura. Este resultado confirma

que o calor de hidratação ganha mais importância com o aumento da espessura dos elementos. Quanto ao momento de ocorrência em todos os casos o pico ocorreu apenas no segundo ou terceiro dia de hidratação, sendo observado que demoram mais a ocorrer nos elementos mais espessos. Tal observação está ligada ao fato do concreto ser um mal condutor de calor de modo que o interior tem dificuldade em equilibrar a temperatura perdida na superfície devido à longa distância que a energia térmica precisa percorrer enfrentando a resistência térmica do material.

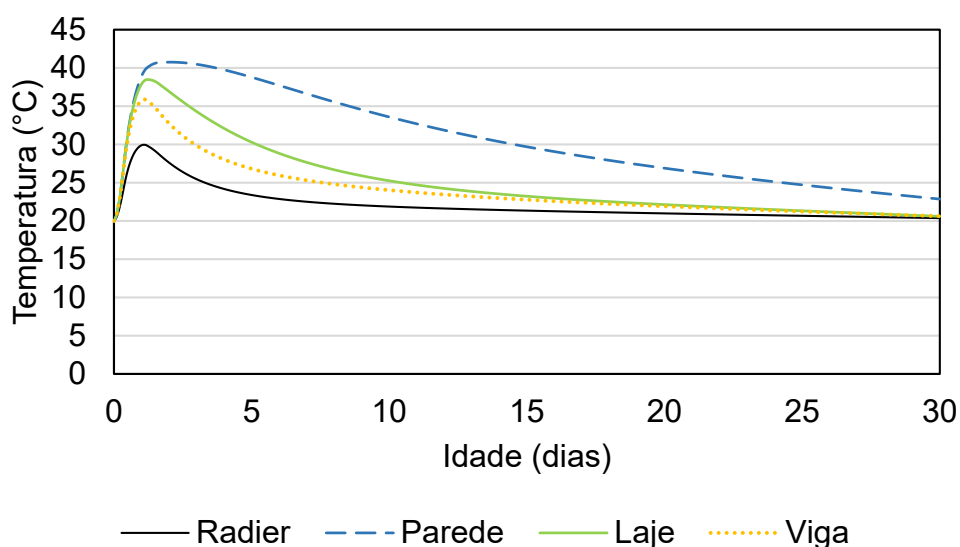
Tabela 8 – Temperaturas máximas e instantes de ocorrência

Elemento	Radier	Parede	Laje	Viga
Temp. (°C)	29.95	40.75	38.45	35.86
Tempo (s)	93600	180000	108000	93600
Tempo (h)	26	50	30	26
Tempo (dias)	1.08	2.08	1.25	1.08

Fonte: Autor (2018).

Uma vez obtido o valor de máxima temperatura de cada elemento, localizou-se o ponto de sua ocorrência em cada caso. Para cada um destes pontos foi feito o estudo da evolução da temperatura ao longo de toda a duração da análise. A Figura 19 mostra as curvas de evolução no ponto em que ocorre a máxima temperatura ao longo dos 30 primeiros dias de hidratação de cada elemento construtivo. É importante destacar que estes pontos não são necessariamente o local de máxima temperatura durante todo o período.

Figura 19 – Temperatura ao longo do tempo nos diferentes elementos construtivos



Fonte: Autor (2018).

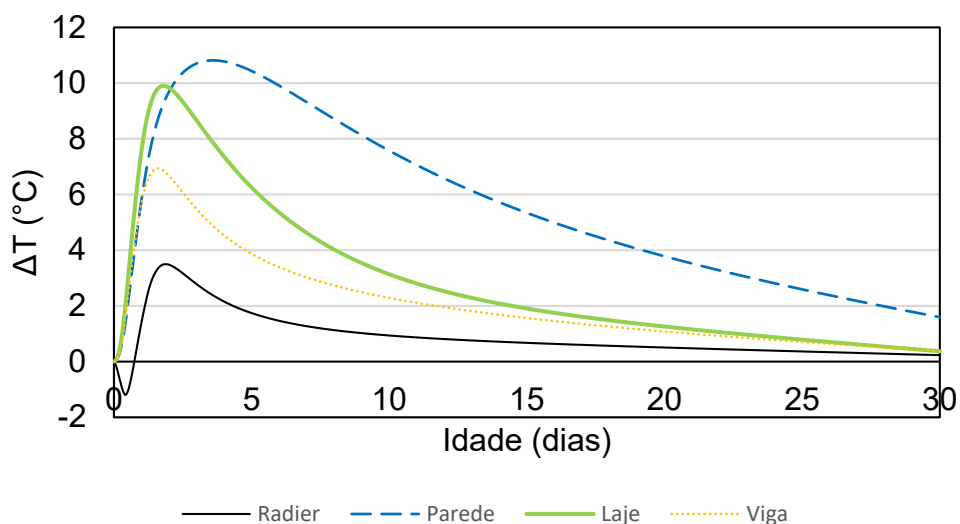
É possível confirmar e estender a observação feita para o instante de máxima temperatura em relação ao seu valor e a espessura da peça para todo o período analisado. Observando o gráfico destaca-se também a ocorrência de um aumento rápido de temperatura no início do processo de hidratação até atingir seu ponto de máximo. Depois disso a queda é mais suave e com o tempo tende assintoticamente à temperatura inicial. Com 30 dias o efeito da geração de calor na temperatura dos elementos se mostrou pouco significativa, estando próximo à temperatura inicial do problema. Isso indica que nesse caso o problema térmico é mais importante nos primeiros dias até aproximadamente uma semana. Justamente quando a resistência do concreto é mais baixa.

Para verificar a intensidade do gradiente de temperatura, foi comparado o valor de temperaturas no interior de cada elemento e sua superfície mais fria ao longo do tempo. Com exceção do radier que verificou-se a diferença de temperatura entre a sua superfície inferior e a superior na posição do canto central do corte estudado. Para a parede comparou-se a diferença de temperatura entre o centro da parede B e sua superfície externa, ambas aproximadamente na metade de sua altura. Para a laje e a viga se comparou um ponto localizado no interior de cada elemento próximo ao centro de sua altura e o ponto localizado na superfície superior, ambos localizados no canto central do corte.

A Figura 20 apresenta os valores obtidos para a diferença de temperatura entre os pontos observados para cada elemento construtivo. É possível observar que a maior diferença de temperatura ocorre na parede, que é o elemento mais espesso, confirmando que em elementos massivos de concreto ocorrem maiores gradientes térmicos, sugerindo que as maiores tensões ocorrerão neste elemento também.

Destaca-se ainda que o maior gradiente ocorreu em todos os casos algum tempo após se atingir a temperatura máxima. Para a viga aproximadamente 12 horas, para a laje 16 horas, para o radier 20 horas e para a parede 36 horas. A parte negativa observada no gráfico do radier significa que nesta região a temperatura na face superior é maior que na inferior.

Figura 20 – Diferença de temperatura entre 2 pontos escolhidos em cada elemento construtivo

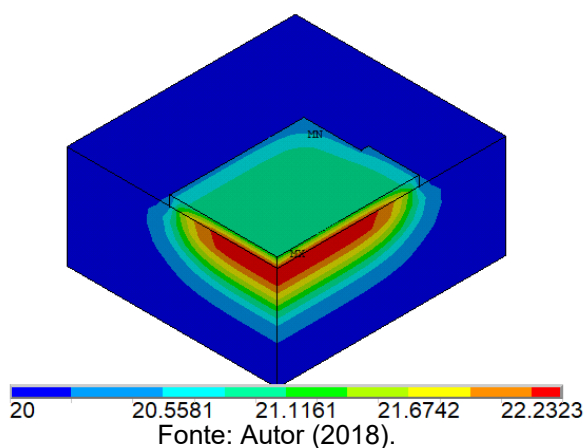


Fonte: Autor (2018).

A temperatura máxima devida à geração de calor de cada elemento não permanece no mesmo ponto ao longo do tempo, existindo uma tendência do calor migrar para regiões mais distantes das superfícies que perdem energia por convecção. Podendo até mesmo apresentar seus valores máximos em outros elementos em contato com o gerador de calor com o passar do tempo. Foi observado que no radier, na laje e na viga, por apresentarem uma espessura relativamente baixa, ocorreu o movimento da região de máximas temperaturas para outros elementos em que estes tinham contato.

Com o tempo o calor gerado pelo radier passou a causar os maiores valores de temperatura no solo como pode ser observado na Figura 21. Para a laje, a região de maior temperatura migrou para a área que compreende sua face inferior e a parte superior da parede B como mostra a Figura 22.

Figura 21 – Migração da temperatura máxima do radier para o solo



Na viga, o processo ocorreu em direção à laje, se concentrando na interseção entre os dois elementos, como mostra a Figura 23. Todas estas figuras mostram a distribuição de temperaturas para a idade de 7 dias de hidratação. O processo se intensifica com o passar do tempo, mas pela redução da temperatura se tornam menos importantes.

Figura 22 – Migração da temperatura máxima da laje em direção à parede

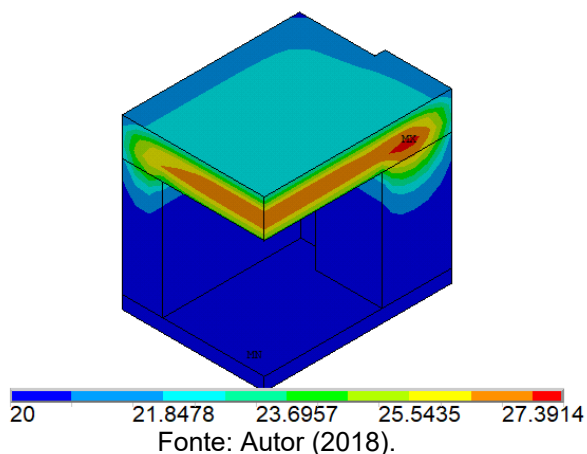
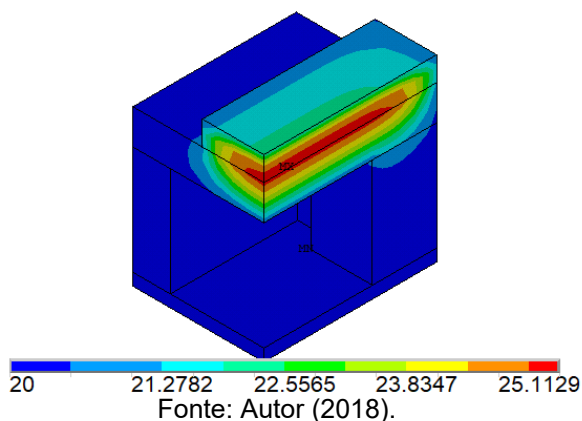


Figura 23 – Migração da temperatura máxima da viga em direção à laje



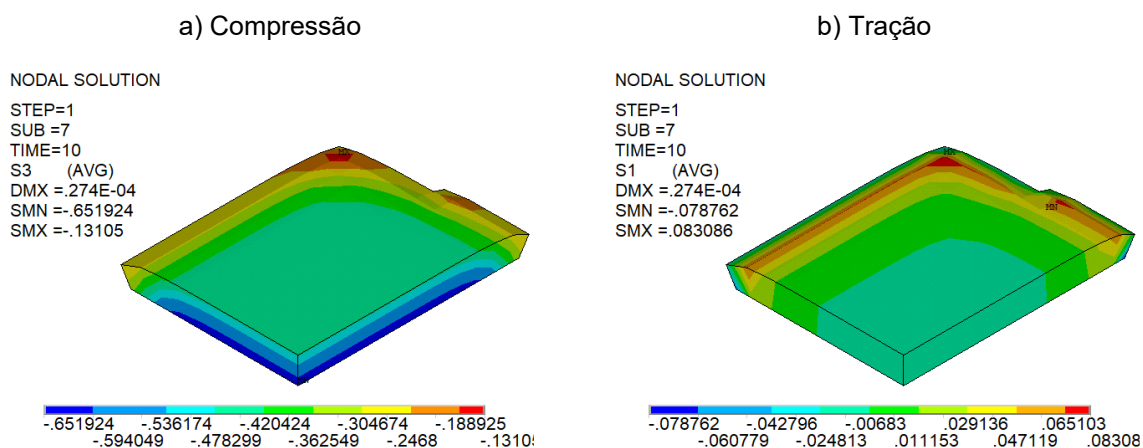
4.1.2 Análise estrutural

Inicialmente são apresentados os valores máximos de tensões principais de tração e compressão e os valores de deformações que acompanham cada caso. A deformação coletada é a deformação final observada, que consiste na soma da deformação térmica com a mecânica.

Para ilustrar a distribuição de tensões são apresentadas as tensões principais para a maior compressão (a) e maior tração (b) para a idade de 3 dias de hidratação do radier (Figura 24), da parede (Figura 25), da laje (Figura 26) e da viga (Figura 27).

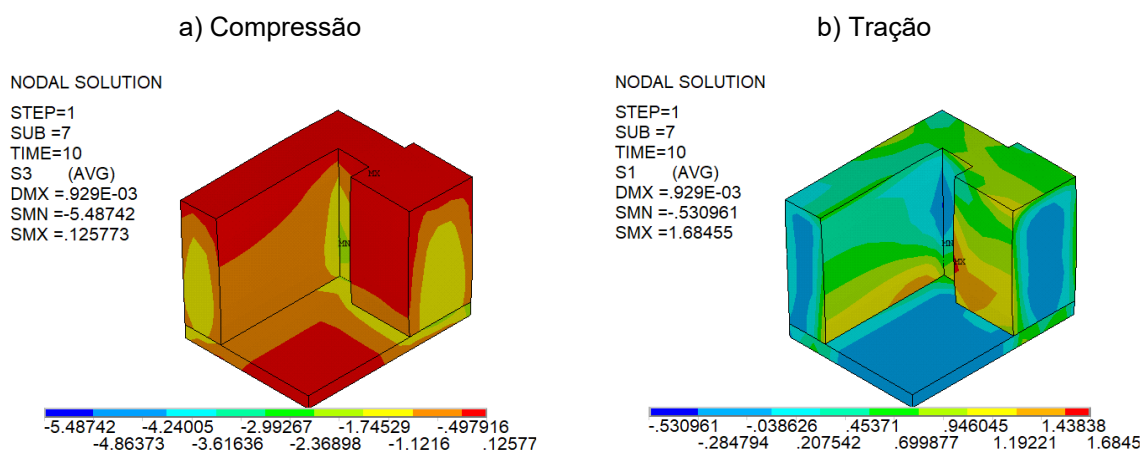
A Figura 28 apresenta os maiores valores de compressão em módulo para cada elemento construtivo durante sua fase de hidratação para as idades analisadas. Observando os resultados é possível perceber que a tensão de compressão é muito superior na parede, podendo inferir que tal resultado é justificado pelo maior gradiente térmico presente neste elemento, além de sua geometria irregular e suas restrições de movimento causadas pelo radier que interferem na liberdade de deformação gerando tensões. Outra observação é que os valores de tensão decresceram com a diminuição da espessura máxima dos elementos. Destaca-se ainda uma tendência de crescimento da tensão até aproximadamente 3 dias e sua diminuição após esse período.

Figura 24 – Tensões principais de compressão (a) e tração (b) no radier aos 3 dias em MPa



Fonte: Autor (2018).

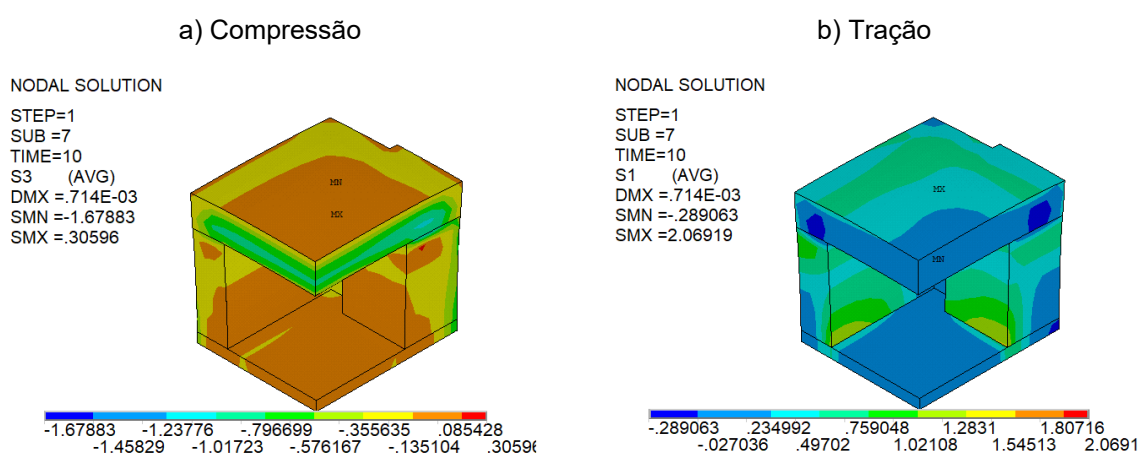
Figura 25 – Tensões principais de compressão (a) e tração (b) nas paredes aos 3 dias em MPa



Fonte: Autor (2018).

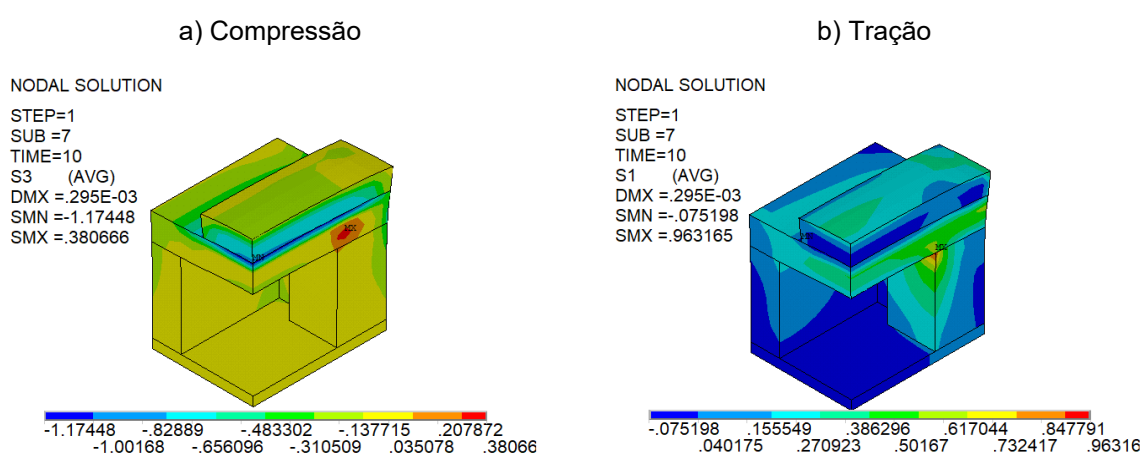
Os valores de deformações relacionados ao maior valor de tensão de compressão são apresentados na Figura 29. Os valores positivos significam encolhimento e os negativos alongamento. O maior encurtamento é observado na parede podendo inferir as mesmas justificativas do caso da tensão. Os valores de encolhimento máximos no radier e na viga foram muito parecidos. A máxima tensão de compressão aparece na parte inferior destes elementos, o radier está com essa face engastada e a viga presa à laje que é mais rígida que ela, ambos apresentam a face superior e as laterais livres, logo as restrições mecânicas parecidas justificam a deformação próxima.

Figura 26 – Tensões principais de compressão (a) e tração (b) na laje aos 3 dias em MPa



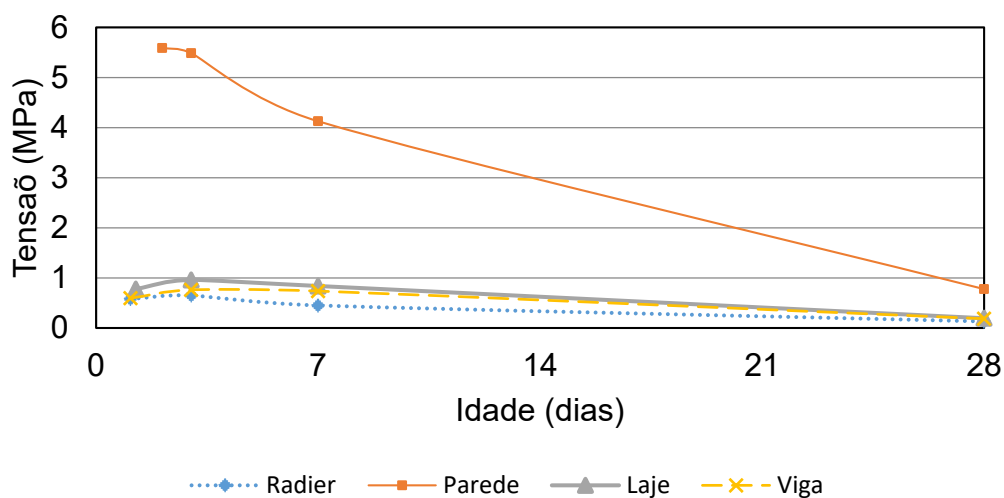
Fonte: Autor (2018).

Figura 27 – Tensões principais de compressão (a) e tração (b) na viga aos 3 dias em MPa



Fonte: Autor (2018).

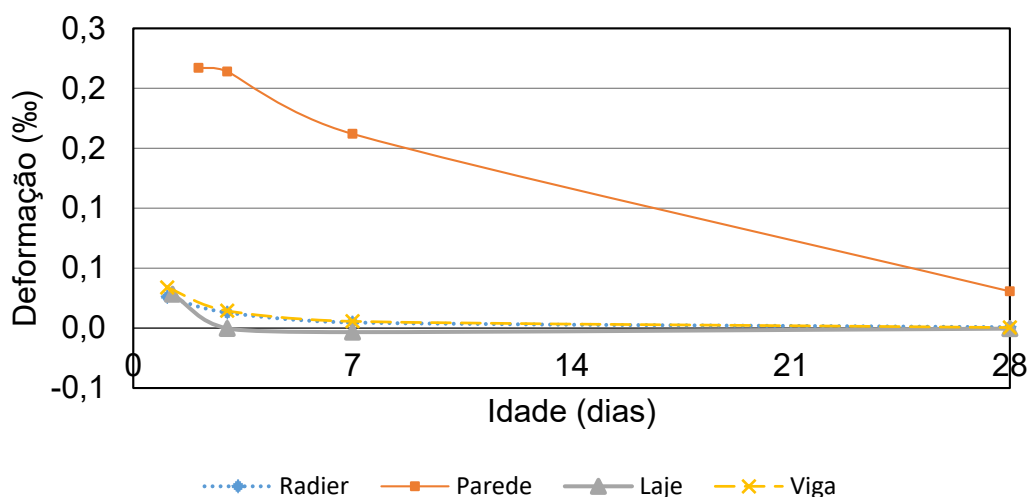
Figura 28 – Máximas tensões principais de compressão em cada elemento construtivo



Fonte: Autor (2018).

Na laje foi observada a ocorrência de alongamento em boa parte do tempo, mesmo sob ação da tensão de compressão máxima. Sugere-se que tal ocorrido seja porque a deformação térmica de alongamento da laje foi muito superior à qualquer deformação mecânica ou térmica que causasse encolhimento, pelo fato da falta de restrição de expansão térmica na maior parte das direções. Dessa forma ao somar os dois valores a resultante ainda foi um alongamento.

Figura 29 – Máximas deformações principais de compressão em cada elemento construtivo



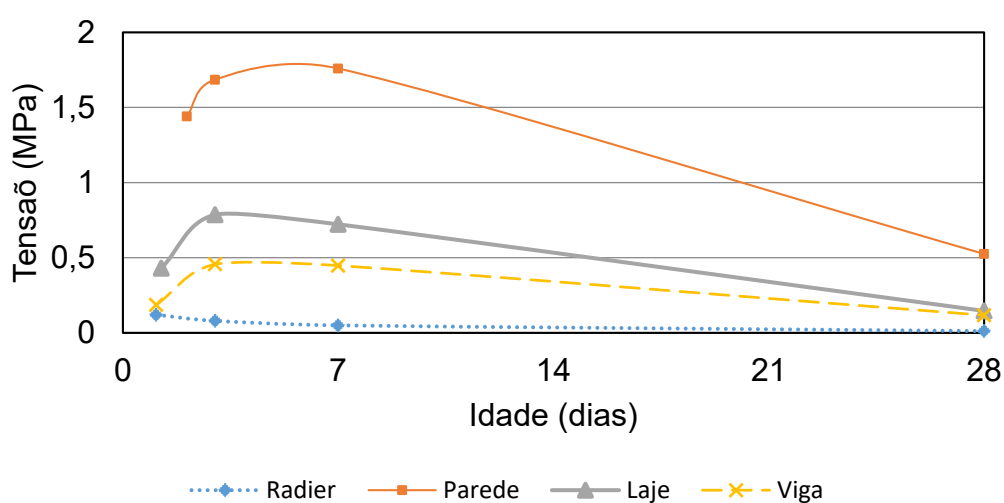
Fonte: Autor (2018).

A Figura 30 apresenta as tensões principais de tração máximas observadas em cada elemento construtivo. Destaca-se novamente que a tensão decresce com a diminuição da espessura máxima do elemento construtivo. A localização da tensão é em regiões próximas à borda do elemento, que têm a temperatura menor devido à perda de calor por convecção, confirmado as observações feitas ao longo do trabalho

sobre o surgimento de tensões de tração em superfícies que resfriam mais que o interior.

Os valores máximos de tensão são observados aproximadamente no mesmo período de tempo em que o gradiente térmico apresenta seus maiores valores para cada elemento. Além disso as maiores tensões são nos elementos com maiores gradientes, que por sua vez são os mais espessos. O radier foi uma exceção que não teve ponto de máximo, sugerindo a necessidade de uma análise mais refinada nele.

Figura 30 – Máximas tensões principais de tração em cada elemento construtivo

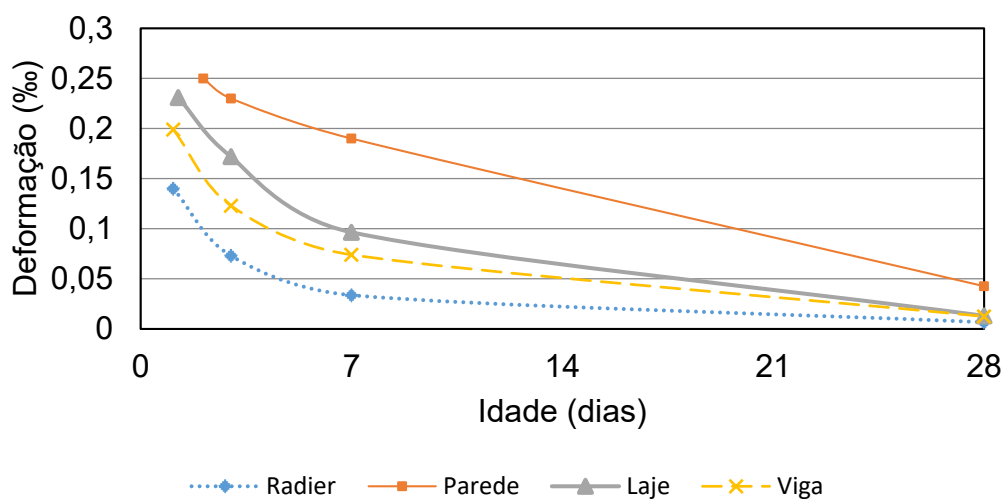


Fonte: Autor (2018).

A Figura 31 apresenta as deformações máximas relacionadas com a tensão de tração principal. Em todos os casos foram observados apenas alongamentos, que sofrem diminuição dos valores com a espessura da peça e com a idade. O caso da espessura se justifica pela redução do gradiente térmico e da temperatura. Já o da idade se justifica pela mudança na relação tensão-deformação onde é necessária uma tensão maior para causar uma mesma deformação no elemento com o passar do tempo, atendendo o esperado para os valores de entrada no programa para esses parâmetros.

Como já mencionado durante a análise dos resultados térmicos, se observou a migração da temperatura para outros elementos que não o gerador de calor causando mudanças de temperaturas consideráveis. Essas mudanças causaram tensões nos elementos endurecidos que em alguns casos foram inclusive superiores às observadas nos elementos no estado fresco. A viga e a laje durante a hidratação causaram tal ocorrido.

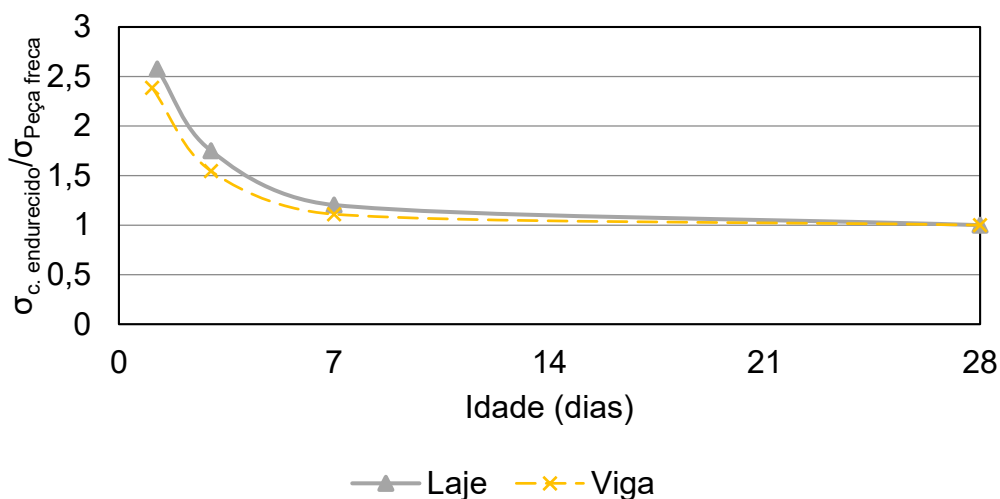
Figura 31 – Máximas deformações principais de tração em cada elemento construtivo



Fonte: Autor (2018).

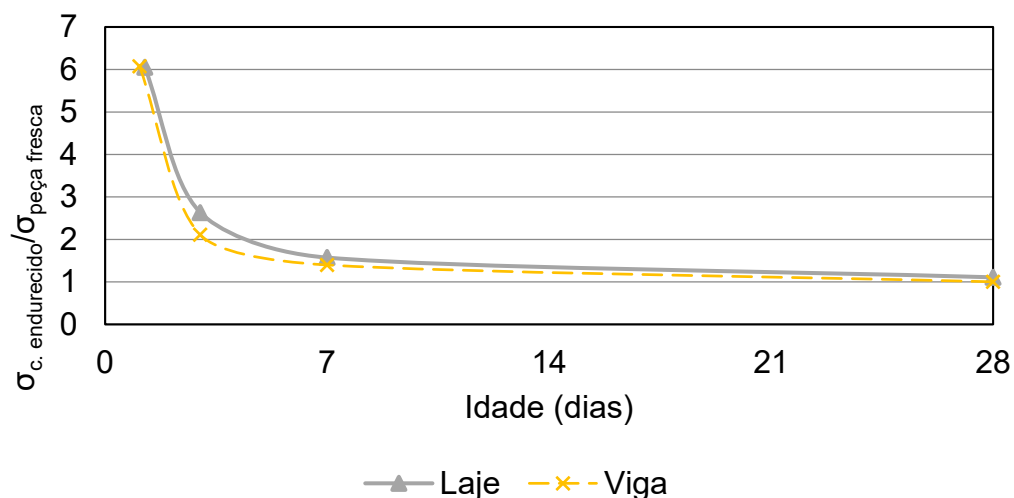
A hidratação da laje causou na parede tensões de compressão até 2,5 vezes a observada nela mesma. E tensões de tração de até 6 vezes. O mesmo foi observado na hidratação da viga em relação à laje. Tal resultado está ligado ao fato do concreto endurecido ser mais rígido que o fresco, apresentando maiores tensões e menores deformações. A Figura 32 mostra a razão entre a tensão de compressão no elemento de concreto endurecido e o elemento que está sofrendo hidratação. Já a Figura 33 mostra resultados análogos de razão considerando a tensão de tração. Nos dois casos pode-se perceber que a razão diminui com o tempo tendendo à valores próximos.

Figura 32 – Razão entre a máxima tensão de compressão no concreto endurecido e a peça fresca



Fonte: Autor (2018).

Figura 33 – Razão entre a máxima tensão de tração no concreto endurecido e a peça fresca

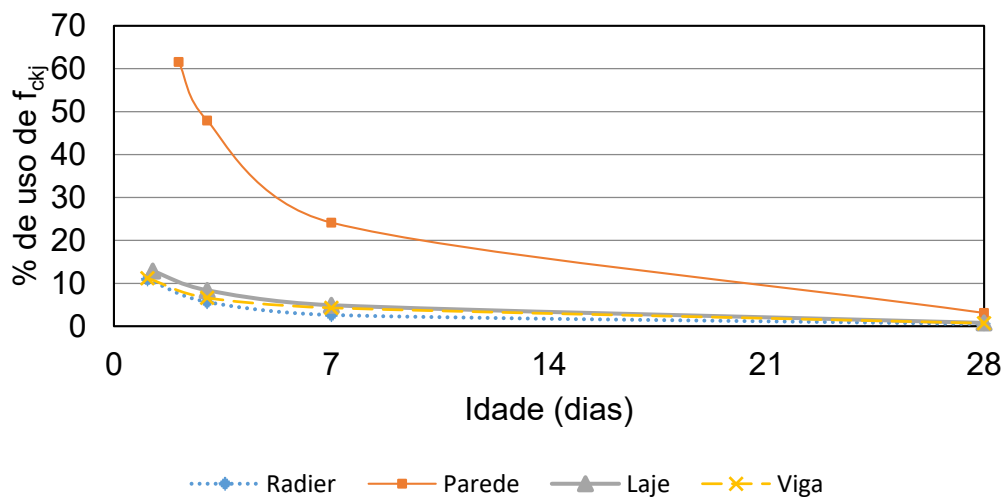


Fonte: Autor (2018).

A principal utilidade de se conhecer os valores de tensões no material é para compará-las com suas tensões resistentes visando descobrir se o elemento se mostra seguro estruturalmente. Nesta etapa o que se fez foi calcular a razão entre as máximas tensões de compressão (Figura 34) e tração (Figura 35) observadas em cada idade e os valores de f_{ckj} e $f_{ct,m}$ respectivamente. Foram consideradas as resistências características à temperatura de 20°C, sem minoração dos valores para temperaturas superiores. Os resultados foram expressos em porcentagem.

Para a compressão, se observou que a parede apresenta aproveitamento maior da capacidade do concreto. O aproveitamento decresce com o aumento da espessura e com o passar do tempo para todos os elementos. Os decrescimentos com o tempo se justificam pelo aumento da resistência do concreto.

Figura 34 – Porcentagem de uso da resistência a compressão do concreto no elemento fresco

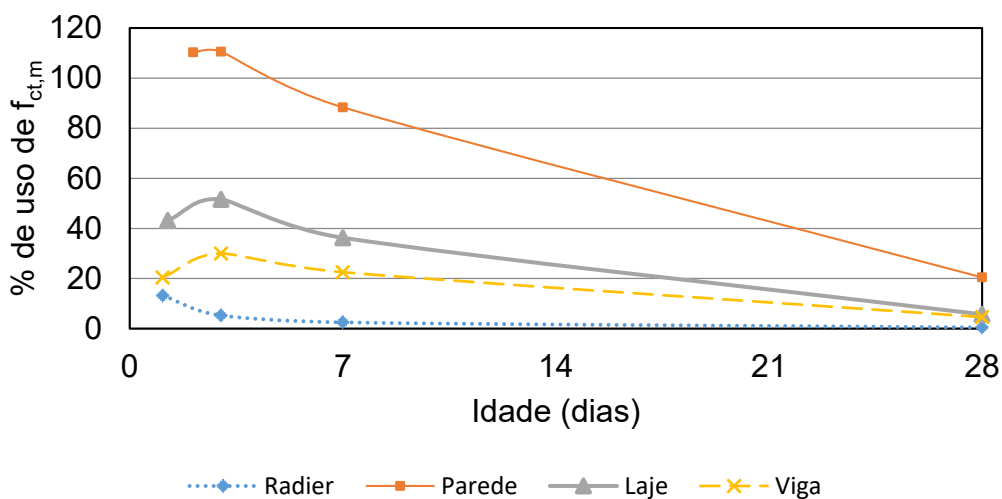


Fonte: Autor (2018).

Para a tração se observa que ocorreu um ponto de máximo aproveitamento ao longo do tempo, localizado próximo ao instante de máximo gradiente térmico. Para a parede o máximo valor foi observado para 7 dias enquanto para viga e laje 3 dias. O radier foi uma exceção e não apresentou ponto de máximo. É importante destacar que a tensão observada na parede superou 100% de sua resistência. Dessa forma a temperatura estará causando fissuras no elemento. Portanto, conclui-se que é necessário o reforço da estrutura de concreto da parede para que resista ao processo de hidratação sem que esse problema ocorra. A adoção de cuidados adicionais na etapa construtiva para reduzir a intensidade da geração de calor como a adição de gelo é uma alternativa, mas a análise realizada não permite quantificar essa redução necessária.

Neste trabalho estão sendo considerados valores característicos, sem uso de coeficientes de segurança que majoram os esforços e minoram as resistências. É importante salientar que a capacidade de resistência à compressão da parede e à tração da laje também podem ser excedidas, visto que apresentam valores de médios a altos do aproveitamento da resistência dos materiais.

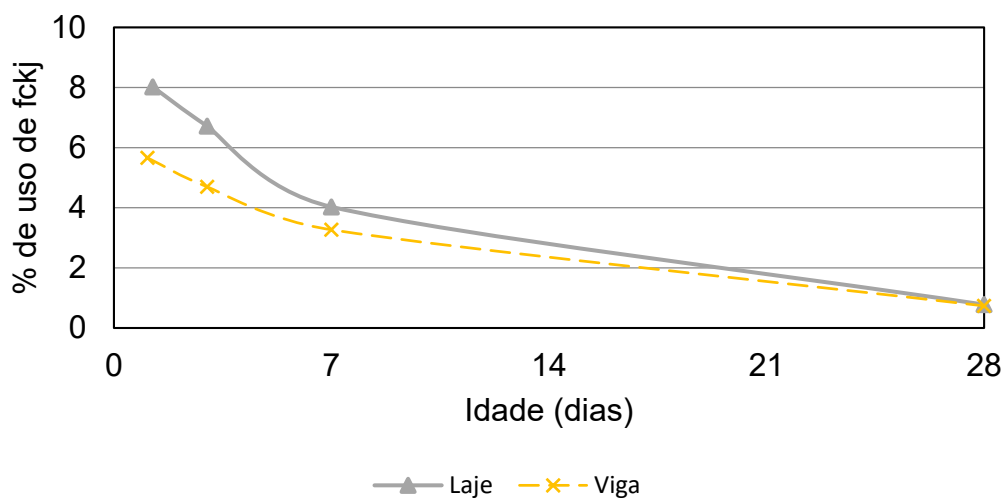
Figura 35 – Porcentagem de uso da resistência a tração do concreto no elemento fresco



Fonte: Autor (2018).

O mesmo estudo de aproveitamento foi feito para o efeito da viga e da laje nos elementos já endurecidos. A Figura 36 mostra o uso da resistência à compressão do concreto endurecido. É possível visualizar que o efeito da temperatura nestes elementos não causa valores de tensões consideráveis que isoladamente possam causar riscos à edificação. Em nenhum caso se superou 10% da capacidade resistente.

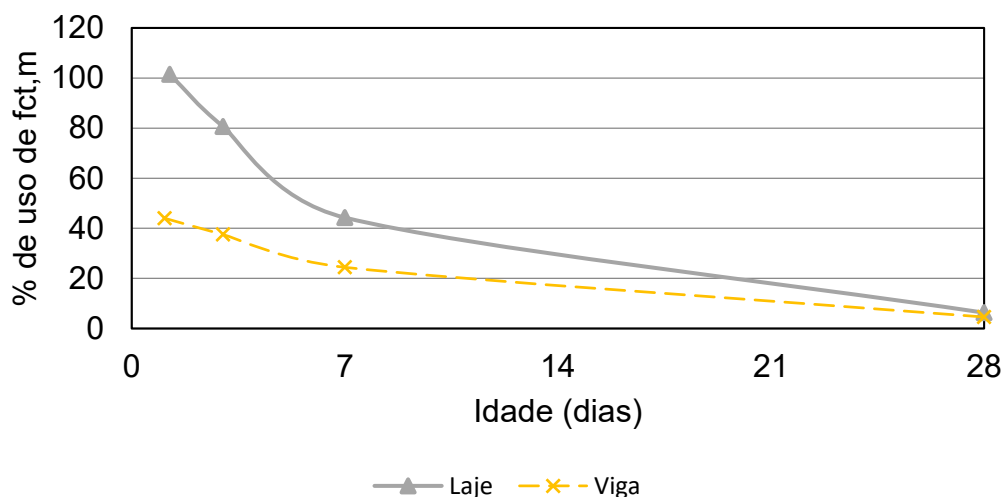
Figura 36 – Porcentagem de uso da resistência a compressão do concreto endurecido



Fonte: Autor (2018).

A Figura 37 mostra que o uso da resistência a tração se mostra considerável inclusive superando a capacidade resistente do concreto endurecido durante a hidratação da laje. Indicando que uma peça endurecida pode sofrer fissuração devido ao calor gerado por outra em contato com ela desde que a peça que gera calor seja espessa.

Figura 37 – Porcentagem de uso da resistência a tração do concreto endurecido



Fonte: Autor (2018).

5 CONCLUSÃO

A principal conclusão que se tira da análise de caso realizada neste trabalho é: Seja a construção de um *bunker* com a geometria analisada, usando cimento pozolânico, concreto de resistência característica de 25 MPa, lançado com temperatura do ambiente igual 20°C, que permanece constante durante o tempo, com ventos baixos, realização de cura que mantém o elemento saturado e manutenção de fôrmas até os

28 dias de cada peça. Neste caso surgirão fissuras no concreto por consequência das tensões térmicas com origem na geração de calor durante a hidratação. Sendo os elementos mais críticos a parede, seguida pela laje. Dessa forma o concreto deve receber reforço ou devem ser tomadas medidas para criar condições de contorno mais favoráveis.

Este resultado é importante do ponto de vista de que as condições consideradas na análise se mostram melhores que boa parte das observadas nos casos práticos. O concreto usado possui baixo calor de hidratação e sua substituição por outro aumenta a taxa de calor gerado. O aumento da temperatura de lançamento do concreto e do ambiente aumenta a geração de calor nas primeiras idades. A existência de ventos aumenta o coeficiente de convecção e o gradiente térmico. A cura inadequada aumenta os efeitos da retração hidráulica, que foram desprezados e favorecem a formação de fissuras. Por fim a retirada das fôrmas em uma idade inferior a considerada aumenta o coeficiente de convecção na superfície e aumenta o gradiente térmico, além de favorecer os problemas vindos da perda de umidade.

Uma medida viável para abrandar o efeito do calor gerado é reduzir artificialmente a temperatura do concreto mediante a adição de gelo para que a taxa de geração de calor seja reduzida, causando a redução do gradiente térmico e conseqüentemente das tensões.

Outra conclusão que se tira é que quando se constrói uma estrutura de concreto com volume considerável ligado rigidamente a uma outra já endurecida, esta última deve ter sua segurança verificada quanto às tensões de tração causadas pela geração de calor do novo elemento.

De maneira geral foi possível confirmar que com o aumento do volume dos elementos de concreto a variação de temperatura gerada durante a hidratação se torna uma variável crítica do ponto de vista estrutural. Confirmando toda a literatura consultada.

As limitações do modelo analisado consistem principalmente nas simplificações feitas. A convecção é um valor que depende de vários fatores entre eles a geometria, dia e noite, entre outros. Não foi feito um estudo específico para seu uso. Algumas propriedades térmicas e mecânicas dos materiais foram mantidas constantes, mesmo não sendo. Entretanto essas simplificações têm se mostrado aceitáveis, fornecendo resultados precisos. Mas a principal limitação do modelo foi o desprezo dos efeitos da

variação da umidade e conseqüentemente da retração térmica, visto que não se consegue manter o ambiente em condições de saturação. Nos modelos mais avançados a umidade e a temperatura são tratadas juntas, nos chamados modelos higo-termo mecânicos.

Tendo em vista as limitações do trabalho apresentado, existe várias direções para dar seqüência a ele. Sendo as principais a consideração do efeito da umidade acoplado ao da temperatura e a modelagem estrutural considerando sua armadura e as propriedades de resistência a tração e compressão dentro do modelo para coleta das fissuras e tensões reajustadas após as aberturas destas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEWEB. Resfriamento do concreto com gelo evita a formação de trincas. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/resfriamento-do-concreto-com-gelo-evita-a-formacao-de-trincas_14517_10_0>. Acesso em: 10 nov. 2018.

ANSYS, Mechanical APDL version 17, Canonsberg (PA): ANSYS Inc. (2016).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7ª ed. São Paulo. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738** – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

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

_____. **NBR 12655** – Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015

_____. **NBR 14432** – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14931** – Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15200** – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

ATRUSHI, D.S. **Tensile and Compressive Creep at early age concrete: testing and modelling**. Tese (doutorado) – Department of Civil Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega, 2003.

AZENHA, M. A. D. **Numerical Simulation of The Structural Behaviour of Concrete Since Its Early Ages**. Tese (doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

BEER, F. P. / JOHNSTON, E. R. J.; DEWOLF J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos materiais**. 5ª ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2011.

BRASIL ESCOLA. Acelerador Linear. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/acelerador-linear.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e engenharia de Materiais**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014**. 4ª ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

ÇERGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa**. 3ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.

CINPOR. Catálogo Gama Cimpor. Disponível em: < <http://www.cimpor-portugal.pt> >. Acesso em: 10 nov. 2018.

COLIMODIO, V. S. **Modelos numéricos para fluência básica do concreto:**

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

DUARTE, A. P. L. **Avaliação de propriedades termo-hidráulicas de solos requeridas na aplicação da técnica de dessorção térmica**. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

et en traction, du jeune âge au long terme. Tese (doutorado) – Civil Engineering, École normale supérieure de Cachan, Cachan, 2014.

EUROCODE 2 – **Design of concrete structures – General rules and rules for buildings**. EN 1992-1-1. Bruxelas. 2004.

FIB Model Code for Concrete Structures 2010, International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 2013.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutura**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 2008.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HILAIRE, A. **Étude des déformations différées des bétons en compression et en traction, du jeune âge au long terme**. Tese (doutorado) – Civil Engineering, École normale supérieure de Cachan, Cachan, 2014.

KLEIN, O. J. **Pilares em concreto armado em situação de incêndio submetidos a flexão normal composta**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

KUMAR, P.; KODUR, V. K. R.; Modeling the behavior of load bearing concrete walls under fire exposure. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 993–1003, 2017.

LEONHARDT, F.; MÖNING, E. **Construções de concreto, vol. 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1977.

LI, Z. **Advanced Concrete Technology**. 1ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P, J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3ª ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

NEWMAN, J. ; CHOO, B. S. **Advanced Concrete Technology: Concrete Properties**. 1ª ed. Edinburgh: Elsevier, 2003a.

NEWMAN, J. ; CHOO, B. S. **Advanced Concrete Technology: Constituent Materials**. 1ª ed. Edinburgh: Elsevier, 2003b.

Revisitando a cadeia de Kelvin. Dissertação (mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016

RIGOBELLO, R.; ALMEIDA, S. J. C.; MUNAIAR, J. N.; MALITE, M.; SILVA, V. P. Influência da Vinculação em Modelos Numéricos de Vigas Mistas de Aço e Concreto em Situação de Incêndio. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, n. 3, v 3, p. 357 - 373, 2010.

ROUX, J. **Pratique de l'eurocode 2**. 1ª ed. Paris: Eyrolles, 2009.

SANTOS, L. F.; BARBOSA, M. P. Avaliação do desempenho das propriedades mecânicas de concretos auto-adensáveis elaborados com diferentes tipos de

cimentos submetidos à cura térmica. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, n. 3, v 4, p. 361-385, 2011.

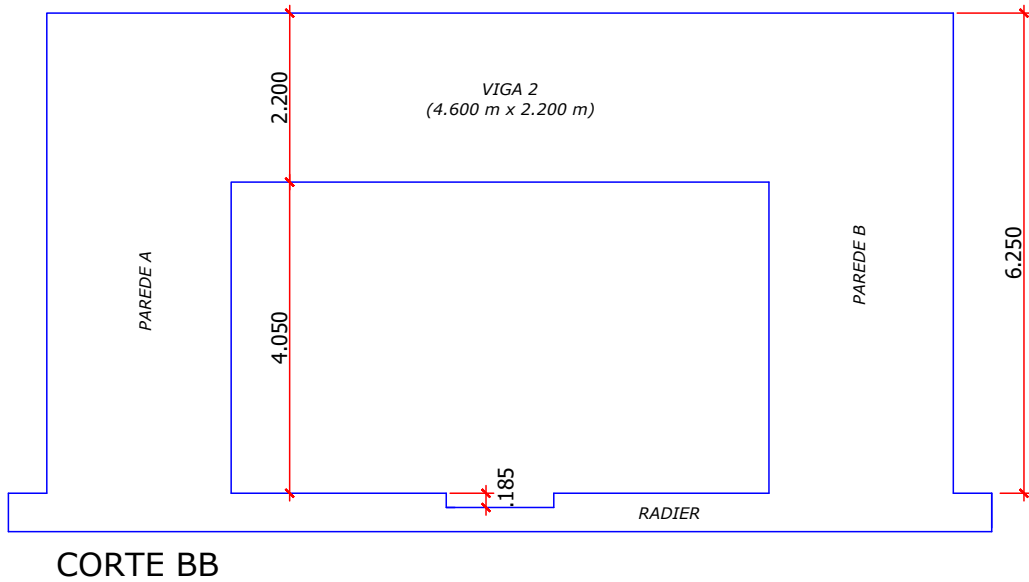
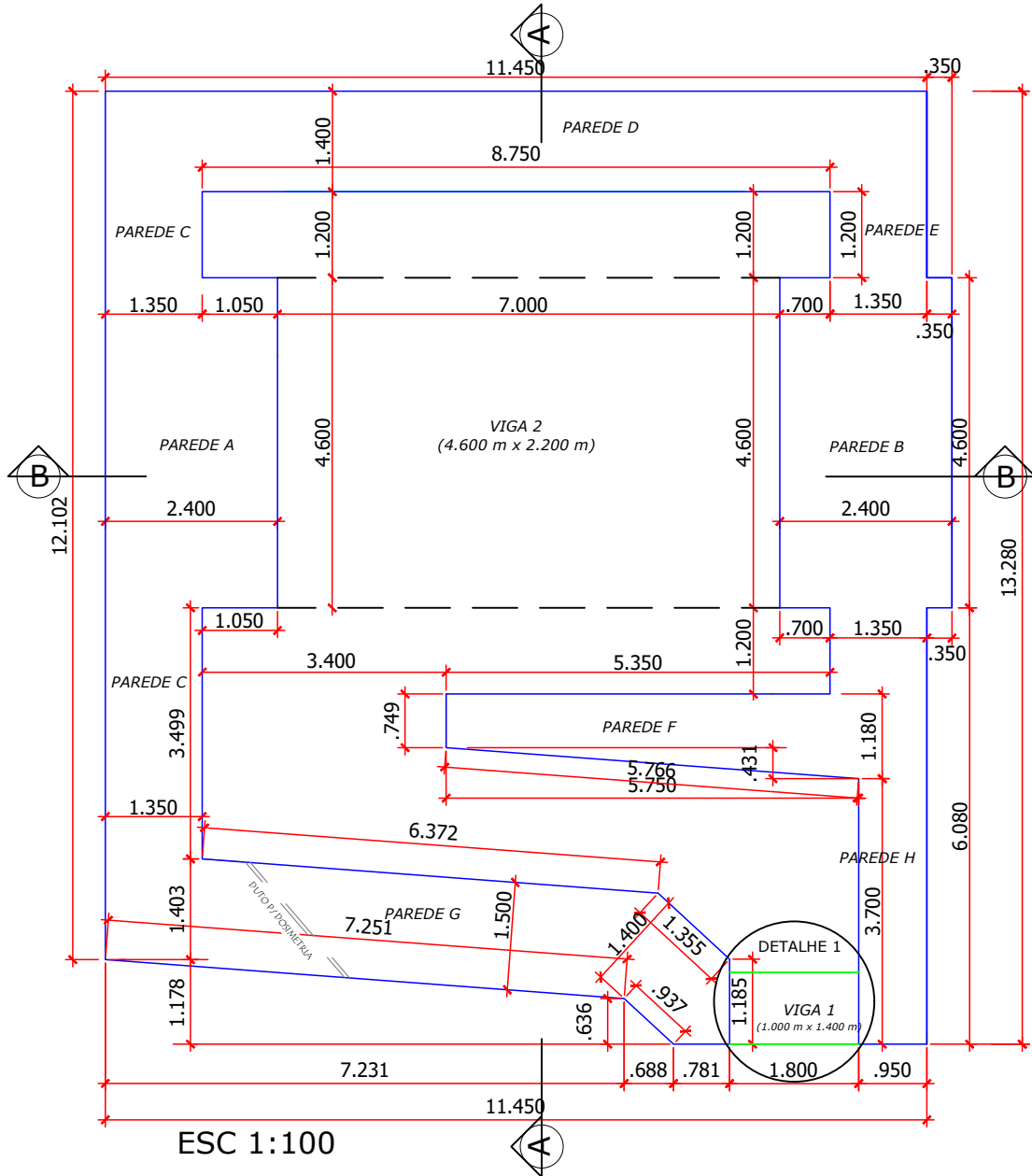
SILVA V. P.; PANNONI, F. D.; PINTO, E. M.; SILVA, A. A. Segurança das estruturas em situação de incêndio. In: **A segurança contra incêndio no Brasil**. 1ª ed. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

TRAPP, J. V. ; KRON, T. **An Introduction to Radiation Protection in Medicine**. 1ª ed. New York: CRC Press, 2008.

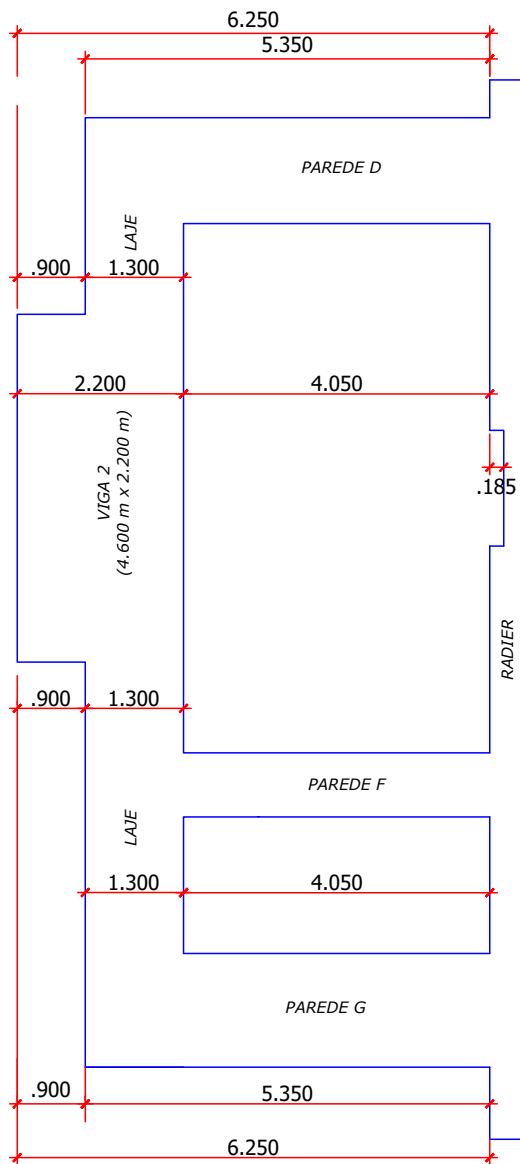
ULM, F.J., COUSSY, O., 1995, "Modeling of thermochemomechanical couplings of concrete at early ages", **Journal of Engineering Mechanics (ASCE)**, v. 121, n. 7, pp. 785-794.

ANEXO A – Forma, cortes detalhes e locação de estacas da estrutura analisada

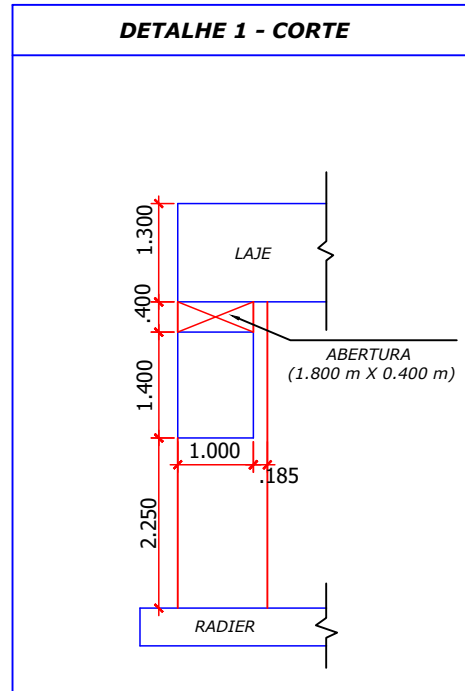
FORMA DAS PAREDES E LAJES



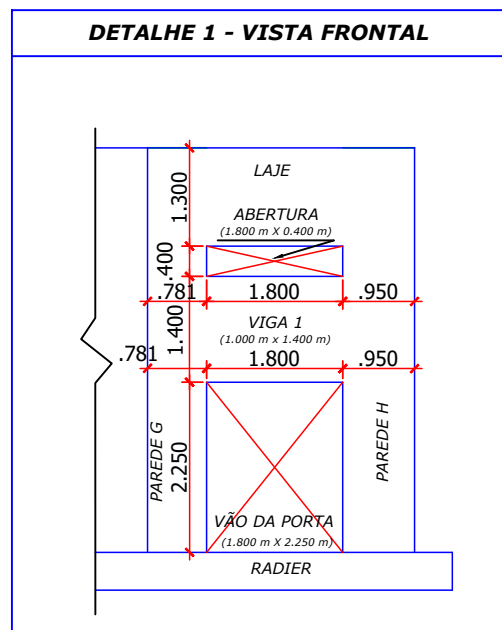
CORTES E DETALHES



CORTE AA
ESC 1:100

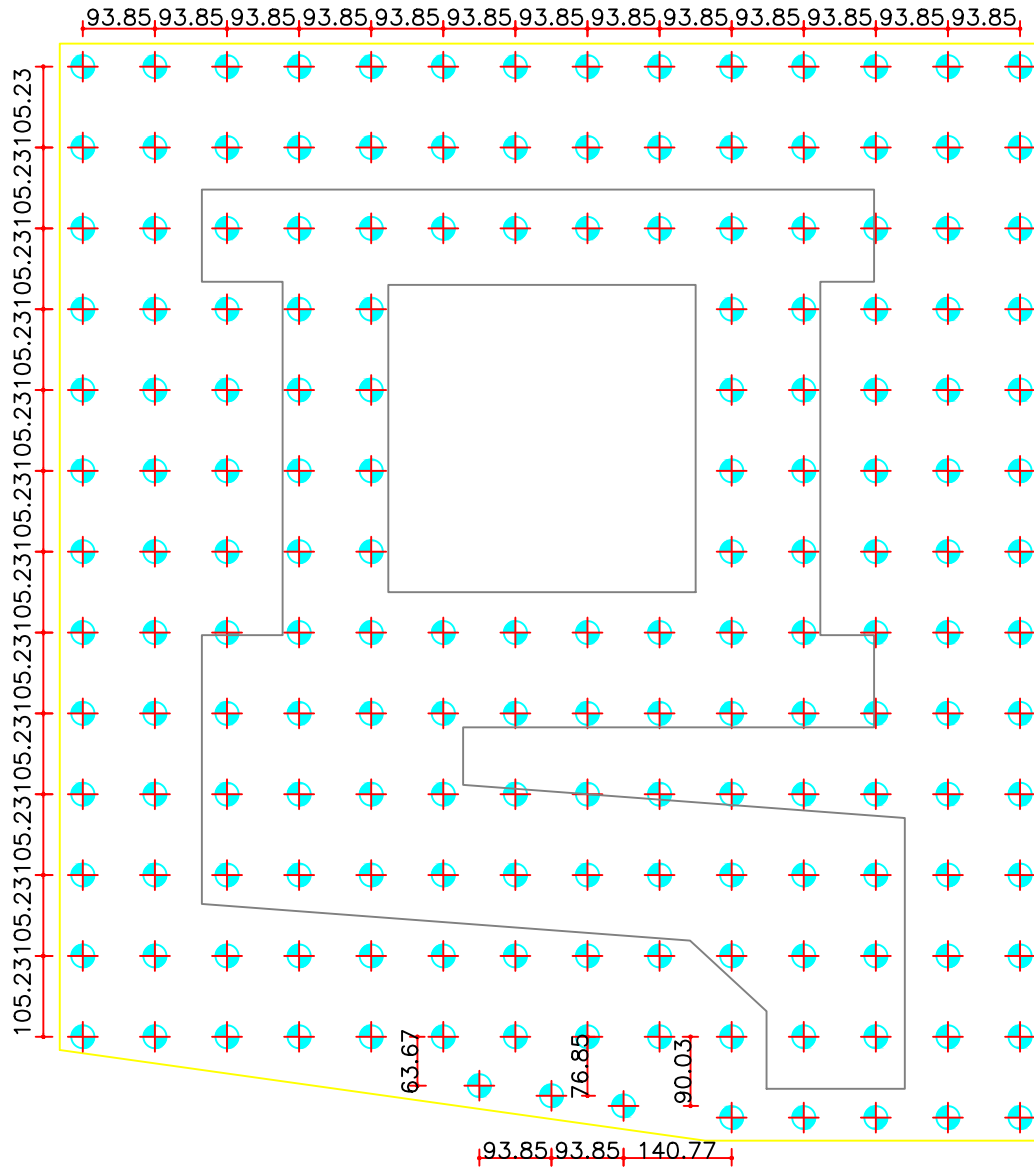


ESC 1:100



ESC 1:100

PROJETO DE FUNDAÇÕES-LOCAÇÃO DAS ESTACAS



Malha com 176 estacas Escavadas $\varnothing 30\text{cm}$, com profundidade mínima estimada em 17,0m em solo natural, para cargas fornecidas.

ESC 1:100

ANEXO B – Valores de entrada no ANSYS para as curvas tensão-deformação para diferentes idades e temperaturas

28 dias				7 dias			
20°C		80°C		20°C		80°C	
ϵ	σ (MPa)	ϵ	σ (MPa)	ϵ	σ (MPa)	ϵ	σ (MPa)
0.0002	4.75	0.0002	3.90	0.0002	3.25	0.0002	2.66
0.0004	9.00	0.0004	7.38	0.0004	6.16	0.0004	5.05
0.0006	12.75	0.0006	10.46	0.0006	8.72	0.0006	7.15
0.0008	16.00	0.0008	13.12	0.0008	10.94	0.0008	8.97
0.0010	18.75	0.0010	15.38	0.0010	12.82	0.0010	10.51
0.0012	21.00	0.0012	17.22	0.0012	14.36	0.0012	11.78
0.0014	22.75	0.0014	18.66	0.0014	15.56	0.0014	12.76
0.0016	24.00	0.0016	19.68	0.0016	16.41	0.0016	13.46
0.0018	24.75	0.0018	20.30	0.0018	16.93	0.0018	13.88
0.0020	25.00	0.0020	20.50	0.0020	17.10	0.0020	14.02
0.0035	25.00	0.0035	20.50	0.0035	17.10	0.0035	14.02
3 dias				2.08 dias			
20°C		80°C		20°C		80°C	
ϵ	σ (MPa)	ϵ	σ (MPa)	ϵ	σ (MPa)	ϵ	σ (MPa)
0.0002	2.18	0.0002	1.78	0.0002	1.73	0.0002	1.42
0.0004	4.12	0.0004	3.38	0.0004	3.27	0.0004	2.68
0.0006	5.84	0.0006	4.79	0.0006	4.63	0.0006	3.80
0.0008	7.33	0.0008	6.01	0.0008	5.81	0.0008	4.76
0.0010	8.59	0.0010	7.04	0.0010	6.81	0.0010	5.58
0.0012	9.62	0.0012	7.89	0.0012	7.63	0.0012	6.25
0.0014	10.42	0.0014	8.54	0.0014	8.26	0.0014	6.77
0.0016	10.99	0.0016	9.01	0.0016	8.71	0.0016	7.15
0.0018	11.34	0.0018	9.30	0.0018	8.99	0.0018	7.37
0.0020	11.45	0.0020	9.39	0.0020	9.08	0.0020	7.44
0.0035	11.45	0.0035	9.39	0.0035	9.08	0.0035	7.44

1.25 dias				1.08 dias			
20°C		80°C		20°C		80°C	
ϵ	σ (MPa)	ϵ	σ (MPa)	ϵ	σ (MPa)	ϵ	σ (MPa)
0.0002	1.15	0.0002	0.94	0.0002	1.01	0.0002	0.83
0.0004	2.18	0.0004	1.79	0.0004	1.91	0.0004	1.56
0.0006	3.09	0.0006	2.53	0.0006	2.70	0.0006	2.22
0.0008	3.87	0.0008	3.18	0.0008	3.39	0.0008	2.78
0.0010	4.54	0.0010	3.72	0.0010	3.97	0.0010	3.26
0.0012	5.08	0.0012	4.17	0.0012	4.45	0.0012	3.65
0.0014	5.51	0.0014	4.52	0.0014	4.82	0.0014	3.95
0.0016	5.81	0.0016	4.76	0.0016	5.08	0.0016	4.17
0.0018	5.99	0.0018	4.91	0.0018	5.24	0.0018	4.30
0.0020	6.05	0.0020	4.96	0.0020	5.30	0.0020	4.34
0.0035	6.05	0.0035	4.96	0.0035	5.30	0.0035	4.34