



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANTONIO CLAUDIO NASCIMENTO DE AGUIAR

OTIMIZAÇÃO DE TRAÇO DE CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO:
aplicação em lajes mistas por elementos finitos

RECIFE
2018

ANTONIO CLAUDIO NASCIMENTO DE AGUIAR

**OTIMIZAÇÃO DE TRAÇO DE CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO:
aplicação em lajes mistas por elementos finitos**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

RECIFE

2018

Catálogo na fonte

Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

A282o Aguiar, Antonio Claudio Nascimento de.

Otimização de traço de concreto leve de alto desempenho:
aplicação em lajes mistas por elementos finitos / Antonio Claudio
Nascimento de Aguiar. – Recife, 2018.

46f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. CLAD. 3. EPS. 4. SAP2000. 5. Cura
térmica. 6. Pó de quartzo. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira
(Orientador). II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**PARECER DA COMISSÃO DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**

ANTONIO CLAUDIO NASCIMENTNO DE AGUIAR

**OTIMIZAÇÃO DE TRAÇO DE CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO:
aplicação em lajes mistas por elementos finitos**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : Engenharia Civil

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato Antonio Claudio Nascimento de Aguiar **APROVADO COM NOTA** _____.

Recife, 30 de Outubro de 2018.

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Orientador)

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (coordenador da disciplina TCC2)

Aos meus pais,
por tudo na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço aos meus pais pelo constante apoio, sem o qual não conseguiria chegar onde cheguei.

Ao professor Arnaldo Carneiro, pela orientação desde muito antes desta monografia.

Aos membros do Concrebuco 2016, Bernardo, Manuela e Marco pelos momentos de trabalho árduo e companheirismo.

Aos meus colegas de curso Felipe, Ellaine, Dicla, Lucas, Mário e Vinícius pelos momentos de descontração, disponibilidade e encorajamento que sempre me deram.

Aos meus Amigos Eduardo, Gabriel, João, Sarah, Ramon pela paciência e afeto.

Aos meus pais Antonio e Penha por tudo que sou, que tenho e que terei.

Aos meus irmãos Rafael e Eliane pela prontidão e incentivo.

Finalmente, deixo minha gratidão a todos que contribuíram na elaboração dessa monografia.

RESUMO

Neste trabalho foi feito um estudo direcionado a construções de grande altura, visando diminuir as deformações devido ao peso próprio, assim como os esforços transmitidos às fundações. Estas construções são comumente produzidas com estruturas metálicas e lajes mistas, devido à alta produtividade desse processo construtivo. Assim, foram realizadas diversas estratégias de otimização de um traço de concreto leve de alto desempenho, ou CLAD, buscando diminuir a densidade do concreto mantendo sua resistência à compressão superior à 50 MPa. A otimização do traço piloto se deu essencialmente pela variação de três parâmetros: adições de micropérolas de poliestireno expandido (EPS), adições de pó de quartzo, e cura térmica. Essas análises foram avaliadas separadamente, e simultaneamente, proporcionando um estudo abrangente e detalhado. Finalmente, o traço otimizado de CLAD com densidade 1660 kg/m³, Fck 64,6 MPa e consumo de cimento 753 kg/m³; foi comparado com os traços de um concreto de uso geral de densidade 2400 kg/m³ com Fck 40 MPa e um concreto de alto desempenho de densidade 2600 kg/m³ e Fck 60 MPa, sendo todos utilizados no pré-dimensionamento de lajes mistas. Esta comparação foi feita através de elementos finitos no software SAP2000, avaliando deformações e peso próprio da estrutura no estado fresco e endurecido para todos os tipos de concretos.

Palavras-chave: CLAD. EPS. SAP2000. Cura térmica. Pó de quartzo

ABSTRACT

This thesis is focused on construction technology for tall buildings, aiming to shorten the structure's deadweight and the stress passed to the foundation. These constructions are usually manufactured with metallic frames and steel deck slabs due to its high productivity. Furthermore, many approaches were made to optimize a high strength lightweight concrete (HSLWC) mix design, intending to maintain its high compressive strength above 50 MPa, while bringing its density to values as small as possible. The optimization was focused on: polystyrene addition; quartz dust filler addition; and thermal curing. These main topics were studied separately and simultaneously, providing a broader and more detailed analysis. Finally, the mix design of the optimized HSLWC with density 1660 kg/m³, compressive strength 64,6 MPa, and cementitious consumption of 753 kg/m³ was compared to a general use concrete (GUC), and a high-strength concrete (HSC), by using these concretes to design a steel deck slab. This comparison was done by the use of finite elements analysis on SAP 2000, evaluating the deflections caused by the deadweight of the pre-designed structure for both fresh and cured concrete (for HSLWC, GUC, and HSC).

Keywords: HSLWC. SAP2000. Polystyrene. Quartz dust. Thermal curing

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	EDIFÍCIOS ALTOS	12
2.2	LAJES MISTAS.....	14
2.3	CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO	15
3	OTIMIZAÇÃO DO TRAÇO	16
3.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	17
3.2	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE LAJES MISTAS	18
3.3	MATERIAIS CONSTITUINTES	21
3.3.1	Cimento portland cpv-ari	22
3.3.2	Adições minerais	23
3.3.3	Agregados	24
3.3.4	Aditivos	25
3.3.5	Água	26
3.3.6	EPS	28
3.3.7	Cura	29
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	29
4.1	SUBSTITUIÇÃO DE EPS	29
4.2	ADIÇÃO DE FILLER	30
4.3	CURA TÉRMICA	31
4.4	TRAÇO FINAL	33
5	AVALIAÇÃO DE FLECHAS ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS ..	34
5.1	MODELAGEM	34
5.2	FLECHAS NA FÔRMA METÁLICA	40
5.3	FLECHAS NA LAJE	42
6	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Acompanhando a tendência de estruturas de grandes alturas para prédios comerciais, muito tem sido estudado a respeito dos métodos construtivos a serem utilizados. Estes métodos muitas vezes primam por produtividade, visto que o capital gerado por uma inauguração mais rápida pode superar a economia proveniente de um método construtivo mais lento. Assim, essas construções tem sido governadas pelo uso de estruturas metálicas e mistas.

As estruturas metálicas tem sido utilizadas desde 1779, hoje estas estruturas representam um dos métodos construtivos mais utilizados. Usualmente são usadas formando uma estrutura de pórtico tridimensional com lajes mistas de fôrma metálica e concreto. Neste caso a escolha do tipo concreto é extremamente determinante para o dimensionamento da estrutura. Segundo o EUROCODE 4, o dimensionamento de lajes mistas é muitas vezes determinado pela flecha máxima da estrutura. Visto que a flecha máxima de uma laje está diretamente ligada a densidade específica do concreto utilizado, foi desenvolvido um traço de concreto visando diminuir o peso próprio da estrutura, causando menores deformações, alívios nos elementos de fundação, assim como, possibilitando o uso de estruturas mais esbeltas e baratas na construção sem prejudicar a produtividade.

Concreto leve de alto desempenho, ou CLAD, é todo concreto cuja densidade é inferior a 2200 kg/m^3 e resistência à compressão maior ou igual a 50 MPa. O desenvolvimento e otimização do CLAD tem se mostrado particularmente importante para a construção civil contemporânea. Uma vez que os custos referentes a transporte de pré-moldados, e peso próprio da estrutura são sensivelmente reduzidos pelo uso do CLAD. Este difere de outros tipos concretos, principalmente pelo uso de agregados leves na sua composição. Estes agregados leves são importantíssimos no desenvolvimento e otimização do concreto, dentre os mais utilizados destacam-se a pedra-pomes e argila expandida. Nesta monografia será utilizada a argila expandida em várias granulometrias a fim de forçar um empacotamento ótimo entre agregados.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal dessa monografia é otimizar um traço de concreto leve de alto desempenho, ou CLAD, para dimensionamento de lajes mistas de fôrma metálica e concreto para estruturas de grande altura. A aplicação do CLAD à essas estruturas representa uma possível diminuição no peso próprio da estrutura, e da flecha máxima provocada pelo peso próprio. Assim, neste estudo, o traço piloto será modificado pela adição de pó de quartzo, micropérolas de EPS e cura térmica para diminuir sua densidade específica mantendo sua resistência à compressão superior a 50MPa. Finalmente, o resultado da otimização do traço de CLAD será comparado com o de outros concretos para verificar a relevância do seu uso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistemas estruturais são agrupamentos de elementos estruturais, sejam estes de concreto, aço, mistos, madeira, ou outros. Especialmente em edifícios, os sistemas estruturais tem como principal função receber os esforços gravitacionais e transmiti-los às fundações. De forma que a escolha de um sistema estrutural adequado para um edifício não é uma questão simples, pois, existem diversos fatores importantes a serem considerados, tais como alinhar o sistema estrutural a funcionalidade do edifício, determinar os materiais a serem utilizados e também escolher e arranjar os elementos estruturais de maneira eficiente.

2.1 EDIFÍCIOS ALTOS

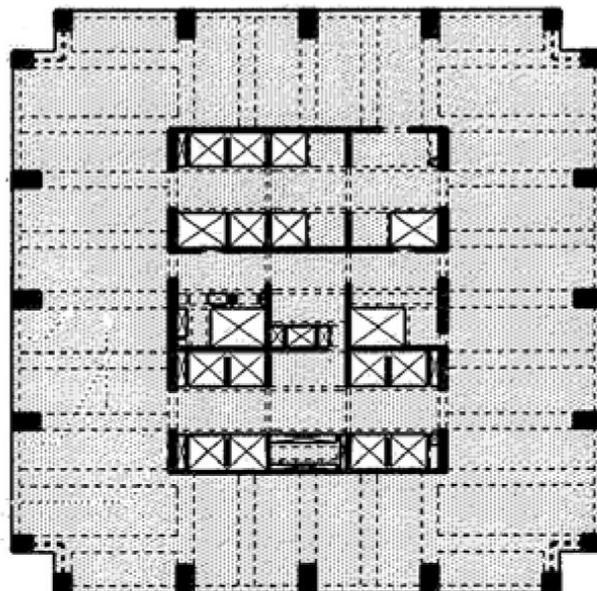
Devido a tendência mundial de concentrar empresas em prédios comerciais cada vez mais altos, buscando economia de escala, muito tem sido estudado a respeito dos métodos construtivos a serem utilizados nesses prédios. Nesses casos, muitas vezes o capital gerado por uma inauguração mais rápida pode superar a economia proveniente de um método construtivo mais lento. Assim, devido a sua grande produtividade associada ao seu processo construtivo, essas edificações tem sido governadas pelo uso de estruturas metálicas e mistas.

No caso de edifícios altos, seus sistemas estruturais tendem a ser tubulares com núcleos de rígidos. Estes são formados por pilares pouco espaçados no exterior do edifício conectados ao núcleo de rigidez. O arranjo destes pilares proporcionam grande rigidez à torção a construção e as conexões horizontais (por vigas, lajes, outros) são responsáveis pelo contraventamento da estrutura. Formando um sistema interligado de grande rigidez. Além disso, o peso próprio da estrutura influencia diretamente nas deformações na estrutura e tamanho dos vãos. Por exemplo, a torre comercial Plaza Rakyat mostrado na figura 1– Kuala Lumpur, com 77 pavimentos, lajes de 12 cm de espessura de concreto armado C40. Esta torre foi utilizada como referência de um edifício de grande altura para este estudo, de forma que foi otimizado o traço de CLAD visando diminuir o peso total do Plaza Rakyat e tentando aumentar o espaçamento dos pilares da estrutura tubular (possibilitando maior aproveitamento do pavimento) através do emprego de lajes mistas com CLAD.

Figura 1 : Torre Comercial Plaza Rakyat, Kuala Lumpur, Malásia.



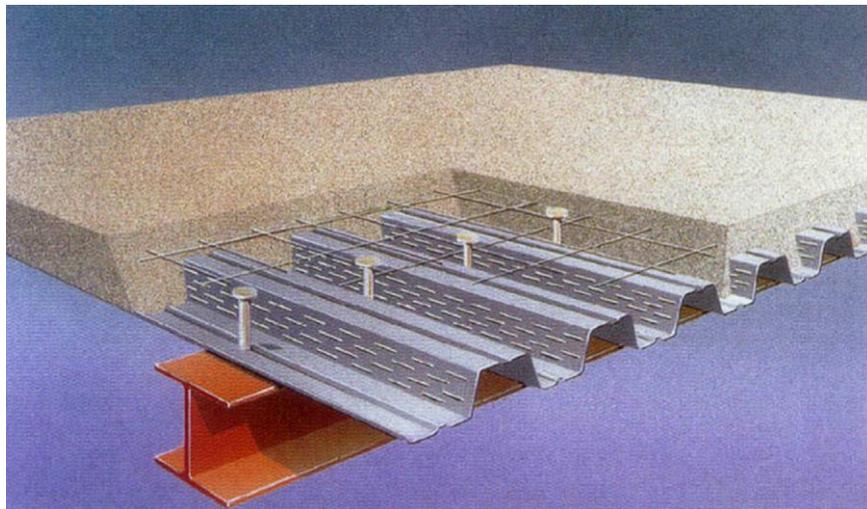
Figura 2: Planta típica da Torre Plaza Rakyat – (BAKER; BROWN; PAWLIKOWSKI; RANKIN, 2013).



2.2 LAJES MISTAS

O sistema de lajes mistas é fundamentado no uso de formas permanentes responsáveis por toda ou parte da resistência à flexão da laje após cura, além de servir de escoramento para a laje ainda com concreto fresco e plataforma de trabalho, ver figura 3. No Brasil, esse sistema ainda é pouco usado, mas na Europa e Estados Unidos este tem sido vastamente aplicado, sendo comumente chamado de Steel Deck. No sistema Steel Deck, as formas são feitas de chapas metálicas nervuradas e parafusos responsáveis pela ancoragem do concreto às chapas, garantindo uma interação parcial ou total entre o concreto e a chapa metálica, sendo determinado no dimensionamento. O comportamento misto acontece apenas após o endurecimento do concreto, pois, é aí que a chapa e o concreto começam a trabalhar juntos. Estruturalmente, as lajes mistas distribuem as deformações por retração, evitam fissuração excessiva, e trabalham como diafragma horizontal contraventando a estrutura lateralmente. Além disso, dentre os estados limites últimos dessas estruturas, destaca-se as deformações máximas para o concreto no estado fresco e endurecido, estes estados de utilização muitas vezes governam o dimensionamento dessas estruturas.

Figura 3: Laje mista – (Fonte ALVA, G.M.S 2000).



2.3 CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO

Dentre as várias inovações na tecnologia do concreto, o concreto leve de alto desempenho, ou CLAD, é caracterizado pela baixa massa específica e alta resistência à compressão. Ainda que existam indícios da utilização de concreto leve na antiga Roma, em elementos do Coliseu e Panteão, e do concreto de alto desempenho em meados de 1960 na cidade de Chicago, pode-se dizer que há bastante a ser pesquisado quanto as suas aplicações e otimização de traço. Existe uma grande tendência mundial, do uso de concreto leve de alto desempenho com finalidade estrutural, devido a fatores econômicos e técnicos. Por exemplo, a ponte de Stolma na Noruega (ver figura 4), que possui um vão bastante grande, teve suas tensões internas reduzidas devido ao uso de CLAD. Logo, a análise do emprego de CLAD à estruturas de grande altura se torna bastante relevante.

Nesse estudo foi utilizado como traço piloto um traço desenvolvido pela Concrebuco UFPE em 2016, equipe destinada a competir no congresso da IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto). Este traço piloto tinha densidade 1820 kg/m^3 , F_{ck} 89,2 MPa, consumo de materiais cimentícios 897 kg/m^3 . A partir deste traço foram realizados cerca de 47 traços, dos quais muitos variaram parâmetros que se mostraram pouco relevantes na otimização do CLAD, os parâmetros relevantes serão discutidos nessa monografia.

Figura 4: Exemplo do uso de CLAD na ponte Stolma, Noruega – (ANDRADE; CARVALHO; AGUIAR; DIAS, 2016).

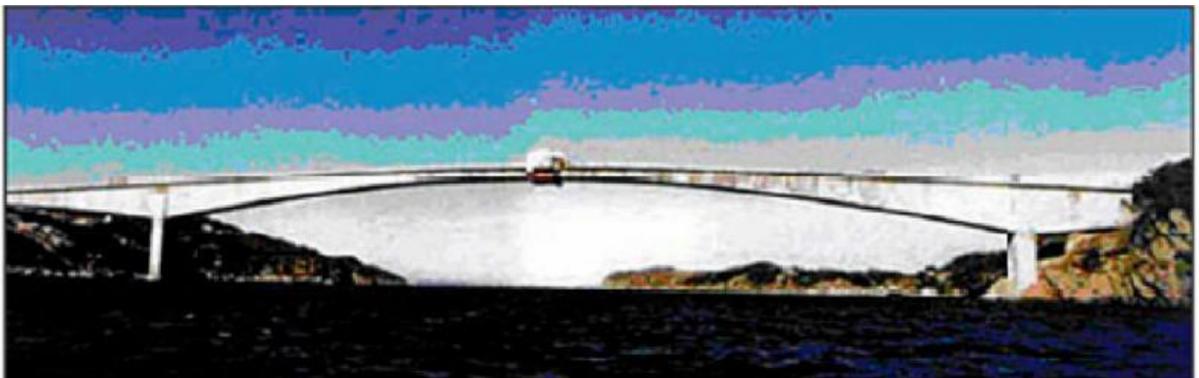
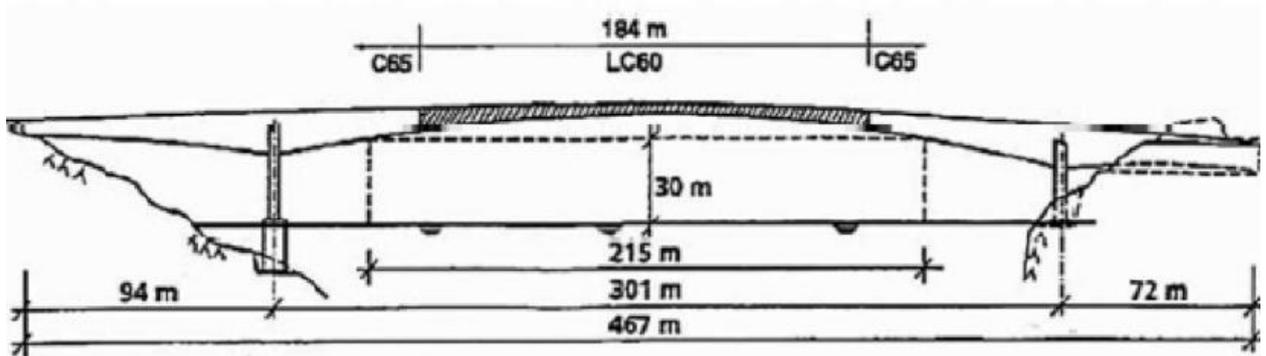


Figura 5: Croqui da ponte Stolma - (ANDRADE; CARVALHO; AGUIAR; DIAS, 2016).



3 OTIMIZAÇÃO DO TRAÇO

A otimização do traço controle de CLAD se mostrou relevante pela possível redução das deformações nas lajes mistas, tendo como objetivo alcançar uma massa específica inferior a 1700 kg/m^3 (que é consideravelmente menor que a apresentada no traço piloto) e resistência superior à 50 MPa. Para isso, foi realizada otimização manual do traço com três variáveis: substituição parcial de EPS, adição de filler, e cura térmica. Avaliando para cada uma delas a resistência à compressão e densidade específica de cada traço realizado.

A substituição dos agregados de argila expandida de 2,4 mm por micropérolas de EPS de 0,6 mm, deve-se ao fato de que estes agregados nessa granulometria se mostraram como os mais frágeis dentre os utilizados no traço piloto. Além disso, uma modificação nas proporções das granulometrias da argila expandida, priorizando agregados finos tornaria a densidade do concreto maior. Por isso foi investigado o uso de micropérolas de EPS, devido a sua densidade consideravelmente inferior aos agregados de argila expandida. Além disso, essas micropérolas possuem resistência superior às pérolas de 2,4 mm utilizadas no artigo “Estudo comparativo entre argila expandida e poliestireno expandido em concreto leve de alto desempenho (CLAD)” (ANDRADE; CARVALHO; AGUIAR; DIAS, 2016).

A adição de materiais inertes, ou fillers, decorreu da constatação de que o traço piloto apresentava cimento não hidratado após a cura, havendo eflorescência do material cimentício pelos poros do concreto. Com isso, foi utilizado pó de quartzo como filler, substituindo o excesso de cimento, haja visto tratar-se de um material silicoso de alta resistência e massa específica consideravelmente inferior.

A cura térmica, além de ser capaz de acelerar o ganho de resistência do concreto, pode favorecer a reatividade do pó de quartzo em produzir silicato de cálcio hidratado (ou CSH), tornando potencialmente o concreto estudado em concreto de pós reativos (CPR). Segundo VANDERLEI (2004) “A microestrutura do concreto de pós reativos mostrou-se diferente dos concretos usuais e de alto desempenho, ou seja, muito mais densa e com baixa

porosidade, o que confere a este tipo de material altíssimas resistências e durabilidade.”. Finalmente, foi feita a cura térmica a 45°C, não utilizando temperaturas mais elevadas pelo risco de formação de etringita tardia, que a longo prazo causaria fissuras internas na matriz cimentícia e comprometeria sua durabilidade.

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes no estudo de dosagem de concreto, podendo ser avaliada diretamente por máquinas de compressão (ver figura 6), ou correlacionada por ensaios específicos, por exemplo: esclerometria e ultra-som. Além disso, a resistência à compressão (F_{ck}) pode ser usada para estimar outras propriedades do concreto, como a resistência à tração. Normalmente a resistência à tração é tida como 10% do F_{ck} .

Nesta monografia foram realizados 3 ensaios de compressão axial após 28 dias de cura para cada traço realizado, de acordo com a NBR 5739:2007. Cada traço representava uma interação de uma variável de otimização, das quais variaram desde empacotamento granulométrico a materiais constituintes, dentre os 47 traços realizados apenas 3 variáveis foram aproveitadas devido a sua relevância. Essas três variáveis aproveitadas foram reanalisadas de forma a obter dados capazes de construir uma curva experimental de forma mais contínua possível.

Figura 6: Ensaio de Compressão Axial



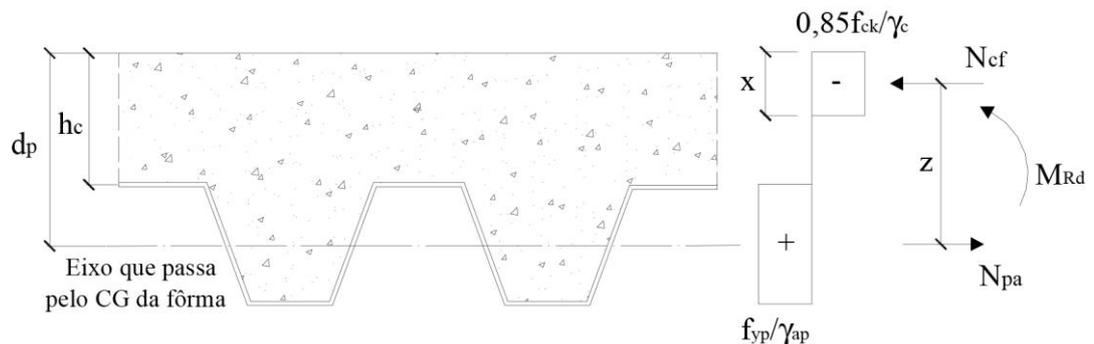
3.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE LAJES MISTAS

Para o cálculo e dimensionamento das lajes internas, será utilizado o EUROCODE 4, que aborda lajes mistas. Além disso, será considerado uma interação completa entre a forma e concreto assim como apenas cargas distribuídas, eliminando o possível deslocamento relativo entre os materiais e o efeito de punção. Finalmente, serão considerados o estados limite último de flexão e estados limite de utilização da flecha.

Para a determinação do momento resistente de cálculo em lajes com interação completa, duas situações são possíveis:

- 1) Linha Neutra acima da fôrma de aço (ver figura 7).

Figura 7: Laje mista com linha neutra acima da fôrma – (Fonte EUROCODE 4, 1994).



Este caso ocorre quando $x \leq h_c$.

A resistência ao momento fletor positivo $M_{p,Rd}$ é calculada com a seguinte expressão:

$$M_{p,Rd} = N_{cf} \left(d_p - \frac{x}{2} \right)$$

onde

$$N_{cf} = N_{pa} = \frac{A_p f_{yp}}{\gamma_{ap}}$$

A_p é a área efetiva da fôrma de aço tracionada;

d_p é a distância do topo da laje ao eixo de gravidade da fôrma de aço;

x é a altura da zona comprimida do concreto, dada por $x = \frac{N_{cf}}{b \left(0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)}$;

b é a largura da seção transversal;

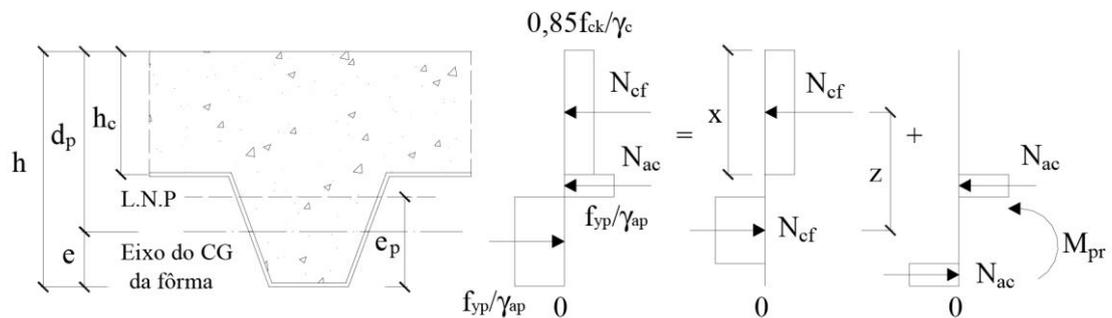
γ_{ap} é o coeficiente de resistência do aço da fôrma, igual a 1,1;

f_{yp} é a resistência ao escoamento do aço da fôrma.

2) Linha Neutra Plástica interceptando a fôrma de aço (ver figura 8).

Para esse caso, foi simplificado o cálculo, desprezando a contribuição do concreto contido na nervura.

Figura 8: Laje mista com linha neutra interceptando a fôrma – (Fonte EUROCODE 4, 1994).



Segundo o EUROCODE 4, a verificação da laje depende se esta é interna ou externa. Quando lajes mistas são bi apoiadas, a flecha pode governar o dimensionamento da laje. Para vãos internos, devemos fazer as seguintes aproximações:

- 1) O momento de inércia de cálculo será a média dos momentos de inércia da seção fissurada e não-fissurada
- 2) O efeito da fluência será contabilizado pela média dos coeficientes de curta e longa duração $n = E / 0,5 E_c$

L/350 – Flecha máxima para concreto endurecido

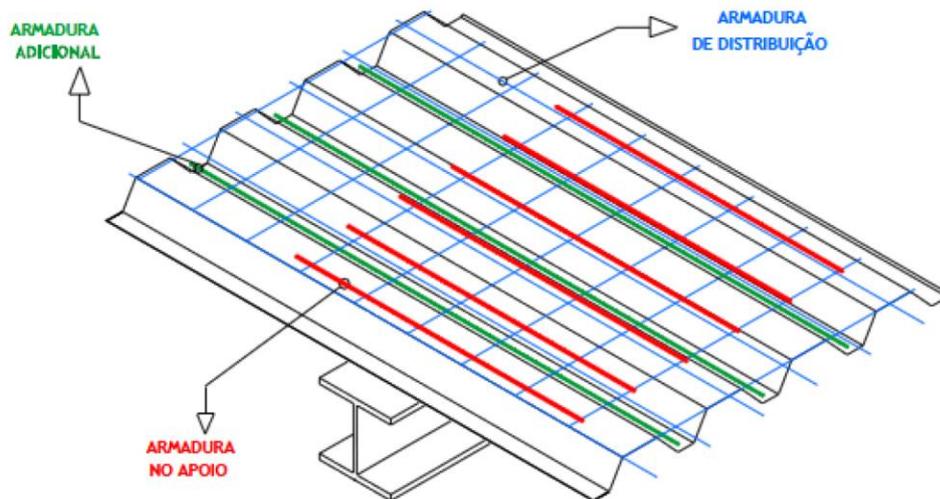
L/500 - Flecha máxima para concreto fresco
(Dados retirados da tabela 13.3 NBR 6118)

3) Fissuração (ver figura 9).

A fissuração deve ser avaliada na superfície superior, pois, a inferior é protegida pela fôrma de aço. O controle das fissuras é feito de acordo com as recomendações do EUROCODE 4 (1991) com recobrimento mínimo de 20 mm, para lajes contínuas simplesmente apoiadas escoradas ou não-escoradas.

- a) Escorada: 0,4% da área de concreto acima da fôrma;
- b) Não-escorada: 0,2% da área de concreto acima da fôrma.

Figura 9: Tipos de armadura numa laje mista – (CARDOSO, 2013).



O momento resistente é calculado com a seguinte expressão:

$$M_{p,Rd} = N_{cf}z + M_{pr}$$

onde

$$N_{cf} = bh_c \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$z = h - \frac{h_c}{2} - e_p + (e_p - e) \frac{N_{cf}}{A_p \frac{f_{yp}}{\gamma_{ap}}};$$

M_{pr} é o momento de plastificação reduzido da fôrma de aço, expresso por:

$$M_{pr} = 1,25M_{pa} \left(1 - \frac{N_{cf}}{A_p \frac{f_{yp}}{\gamma_{ap}}} \right) \leq M_{pa};$$

M_{pa} é o momento de plastificação efetivo da fôrma de aço;

e_p é a distância da linha neutra plástica (L.N.P.) à extremidade inferior da fôrma de aço;

e é a distância do eixo de gravidade da fôrma de aço à sua extremidade inferior;

h é a altura total da laje mista.

3.3 MATERIAIS CONSTITUINTES

No decorrer dessa dissertação serão avaliados vários traços de concreto leve de alto desempenho, dos quais partem do traço de CLAD desenvolvido no artigo “Otimização de Concreto Leve de Alto Desempenho”(CARVALHO; ANDRADE, 2016). Diferindo nas adições minerais, substituições volumétricas de EPS, e cura. As características do traço piloto são fornecidas nas tabelas de 1 a 3.

Tabela 1: Traço unitário em massa (TUM) do CLAD piloto - (CARVALHO; ANDRADE, 2016).

Traço:	Controle
Cimento	1
Silica	0,2
A/C	0,22
Aditivo	0,02
Agregados (argila expandida)	0,7

Tabela 2: Empacotamento otimizado - (CARVALHO; ANDRADE, 2016).

Granulometria	Proporção
Fundo	-
#0.15	0,1
#0.3	0,2
#0.6	0,3
#1.2	0,25
#0.24	0,15

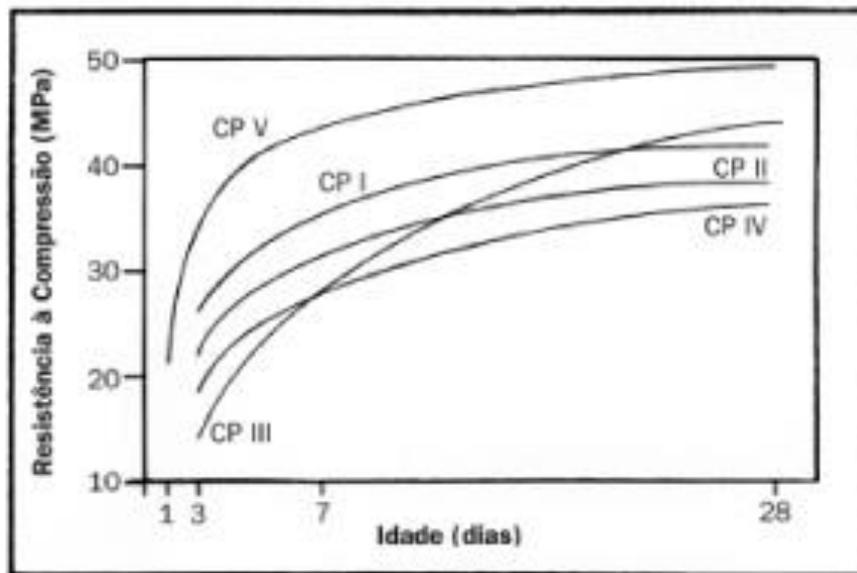
Tabela 3: Características físicas do traço controle - (CARVALHO; ANDRADE, 2016).

Traço:	Controle	Unidade
Massa Específica (γ)	1820	kg/m ³
Resistência à Compressão	89,2	MPa
Consumo Cimentício	897	kg/m ³

3.3.1 CIMENTO PORTLAND CPV-ARI

Na construção civil, utiliza-se mais comumente, para a produção de concretos e argamassas, o cimento Portland, que é um aglomerante hidráulico cujo endurecimento ocorre por meio de reações químicas quando este material entra em contato com a água – hidratação – havendo a formação de um produto final estável em meio aquoso (MEHTA e MONTEIRO, 2006; NEVILLE, 1997). Especialmente, o CPV-ARI é caracterizado pela alta resistência inicial e alto calor de hidratação devido a presença abundante de Silicato tricálcio (C₃S, aproximadamente 60%), sendo superior a outros tipos de cimento (ver figura 10). Nesse estudo foi utilizado cimento Nacional CPV-ARI MAX da Brennand Cimentos.

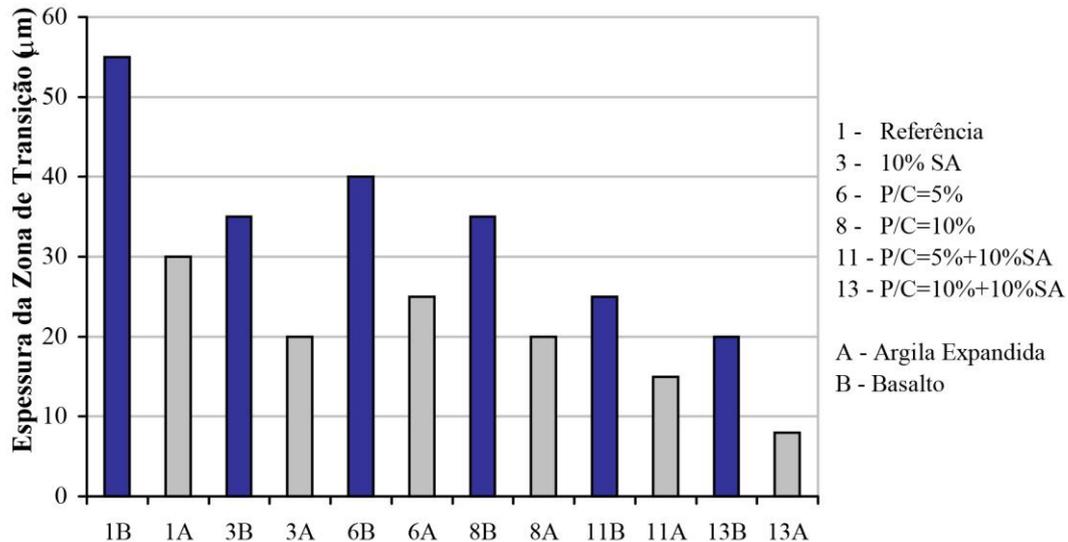
Figura 10: Crescimento na resistência à compressão em cimentos de tipos diferentes – (GOLDENBERG,2017).



3.3.2 ADIÇÕES MINERAIS

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2006), as adições minerais são definidas como materiais silicosos moídos, adicionados ao concreto fresco em quantidades relativamente grande, em geral na faixa de 20% a 100% da massa do cimento Portland. Nesse estudo foi usado a sílica ativa (SA) e pó de quartzo como adições minerais. Primeiramente, a sílica ativa tem como finalidade aumentar o desempenho do concreto devido a sua reação com o CH (hidróxido de cálcio) presente na matriz cimentícia, provocando diminuição na zona de transição agregado-matriz tornando a matriz mais resistente, ver figura 11. Além disso, o pó de quartzo, se comporta como um filler de alta resistência e peso específico consideravelmente menor que o do cimento. De acordo com MONTEIRO (1993), a baixa relação Ca/Si da matriz de cimento, provocado pela adição de SA permite que os silicatos de cálcio (CSH) tenham maior capacidade para incorporar íons, aumentando a resistência do concreto.

Figura 11: Espessura da zona de transição variando a porcentagem da sílica Ativa(SA) e a relação polímero cimento (P/C) – (ROSSIGNOLO, 2009).



3.3.3 AGREGADOS

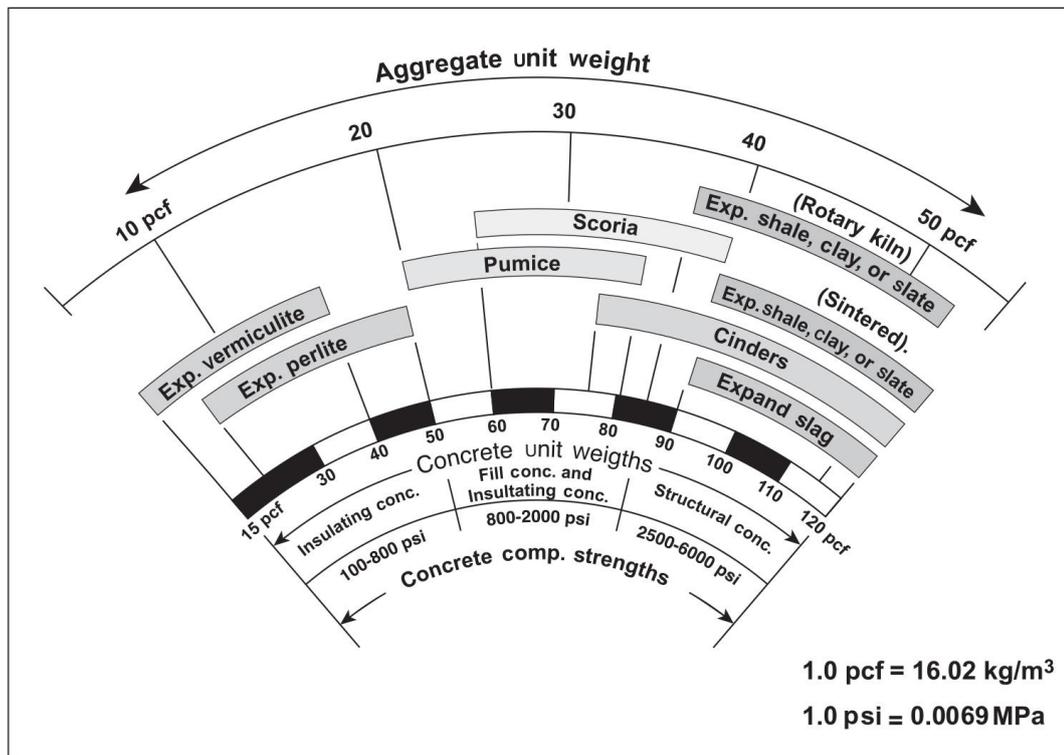
Os agregados são tradicionalmente tratados como materiais de enchimento dentro do concreto, pelo fato de não apresentarem reações químicas complexas quando entram em contato com a água, sendo considerados inertes. Porém, esse tratamento secundário dado aos agregados se mostrou errôneo diante de descobertas acerca da influência que os agregados exercem na trabalhabilidade das misturas, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Dentre os vários possíveis agregados disponíveis para fabricação de concreto leve, foi utilizado apenas argila expandida e pérolas de poliestireno expandindo (EPS). De acordo com Paulo J. M. Monteiro e P. Kumar Mehta (2006), a argila expandida está entre os agregados leves de maior resistência, ver figura 12. Além disso, esta é facilmente encontrada em lojas de artigos de jardinagem. Assim, mesmo que seu uso implique em maior consumo de energia para a produção de CLAD, já que para obter a argila expandida é necessário o uso de fornos rotativos. A argila expandida fornece uma boa relação de custo benefício, quando considerado a economia fornecida pelo uso de CLAD em estruturas.

Nesse estudo foi usado unicamente a argila expandida (ou vulcanizada) como agregado do traço controle, esta sendo moída e peneirada para forçar um empacotamento otimizado. Além disso, foram descartados agregados retidos na peneira #3,6, pois foi

observado que granulometrias maiores que 2,4 mm tornavam o concreto muito menos resistente à compressão.

Figura 12: Relação da resistência à compressão em agregados mais usados no concreto leve, tendo a argila expandida (Exp. Clay) dentre os mais resistentes – (Fonte MEHTA; MONTEIRO, 2006).



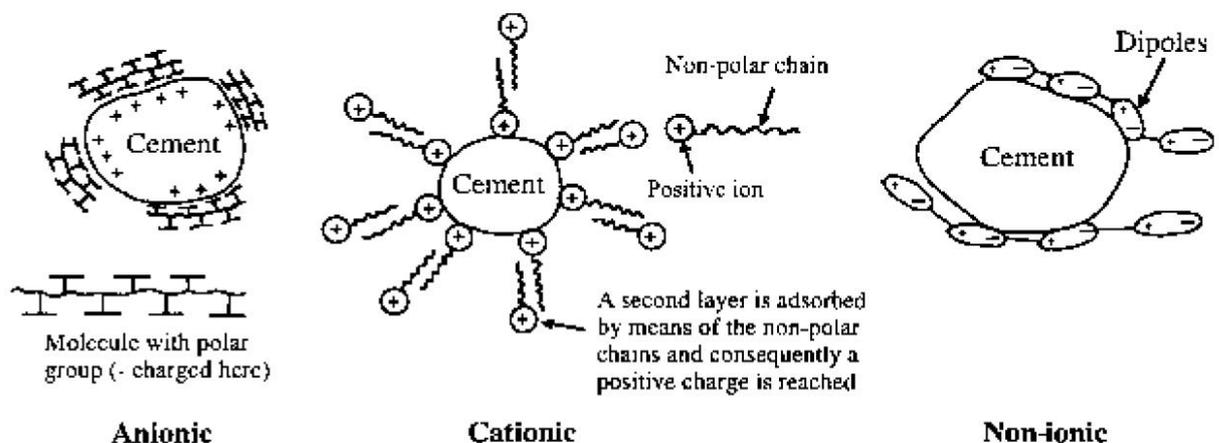
3.3.4 ADITIVOS

O uso de aditivos em concretos, pastas e argamassa vem crescendo significativamente em todo o mundo. Alguns dados mostram que de 70 a 80% de todo o concreto produzido no mundo contenham um ou mais aditivos (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Mesmo que existam aplicações de aditivos datadas de 1500 a.C, muito ainda é pesquisado. Nessa monografia foi utilizado aditivo superplastificante de terceira geração atendendo a NBR 11768 (ABNT, 2011) de massa específica entre 1.06 e 1.08 g/cm³, para aumentar a trabalhabilidade do concreto e reduzir o consumo de água, assim tornando a matriz cimentícia menos porosa e mais resistente.

Os aditivos de terceira geração são compostos por moléculas de policarboxilatos responsáveis pela repulsão eletrostática inter partículas de cimento, sendo capaz de reduzir até

40% da água de amassamento, ver figura 13. As moléculas de policarboxilato apresentam cadeias de 5 a 10 vezes maiores que as moléculas de melamina e naftaleno (usadas na produção de superplastificantes de segunda geração). Com isso, os aditivos a base de policarboxilatos são mais eficientes no aprisionamento de partículas de cimento na matriz cimentícia.

Figura 13: Aprisionamento da partícula de cimento hidratado por molécula sulfonada, causando equilíbrio iônico - (AİTCIN, 1990).



3.3.5 ÁGUA

Segundo MEHTA e AİTCIN (1990), a água utilizada na produção do concreto pode ser dividida em: capilar, absorvida, intra-camadas, e hidratação (ver figura 14). Essas definições são dadas a partir do seu comportamento microscópico na matriz cimentícia.

Água capilar (Capillary water), apresenta vazios de aproximadamente 50 Å, também pode ser chamada de água livre ou de amassamento. Esta é responsável pela trabalhabilidade do concreto.

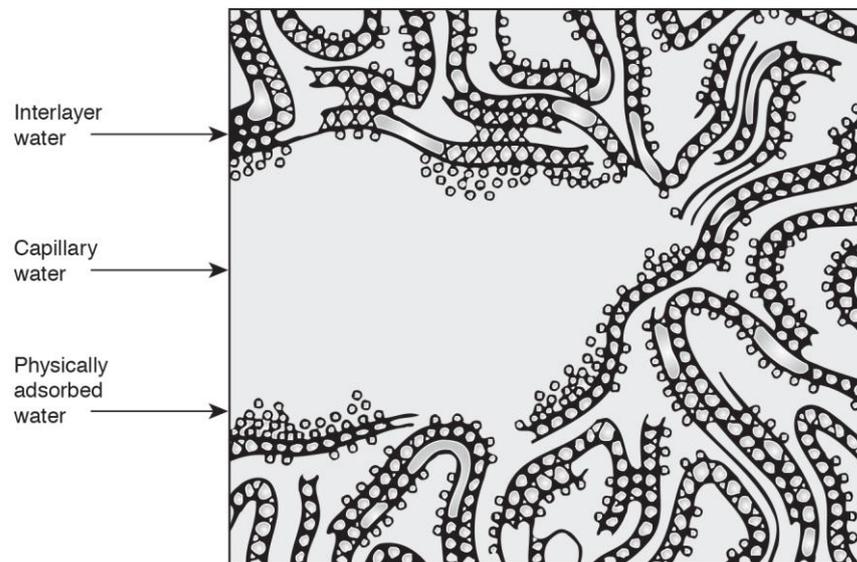
Água absorvida (Physically adsorbed water), tem aproximadamente 15 Å, é aprisionada na maior parte por ligações de ponte de hidrogênio. Sua perda está diretamente relacionada a retração por secagem do concreto.

Água intra-camadas (Interlayer water), está associada às estruturas do gel de silicato de cálcio (CSH) presente na matriz cimentícia, sua perda acontece quando a cura é feita com umidade inferior a 11%, trazendo uma retração considerável ao CSH.

Água de Hidratação (Chemically combined water), responsável pela hidratação do cimento, é componente fundamental para a produção do gel de CSH.

Através desse estudo a respeito dos diferentes tipos de água, foi possível avaliar como a variação da relação água cimento (ou A/C) pode alterar a matriz cimentícia. Alguns dos 47 traços desenvolvidos nesta monografia exploraram a redução A/C do traço piloto, mas apresentaram um ganho na resistência irrelevante quando comparado ao aumento da densidade. Por isso foi mantido o A/C do traço piloto, visto que o objetivo principal era a diminuição da densidade.

Figura 14: Modelo em diagrama dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio - (AÏTCIN, 1990).



Além disso, a qualidade da água utilizada no concreto é de fundamental importância para a produção adequada, pois a presença de impurezas pode ser responsável por efeitos negativos na resistência mecânica do concreto, pode causar manchas na superfície deste material ou até mesmo provocar corrosão das armaduras. Dessa forma, a água não deve conter matéria orgânica indesejável nem substâncias inorgânicas em teores excessivos. Em geral, diz-se que: “A água de amassamento deve ser boa para beber”, mesmo sabendo-se que em muitos casos algumas águas não adequadas para beber podem ser utilizadas de forma satisfatória para o preparo de concretos – desde que apresentem pH entre 6,0 e 8,0, sem serem salobras (NEVILLE, 1997).

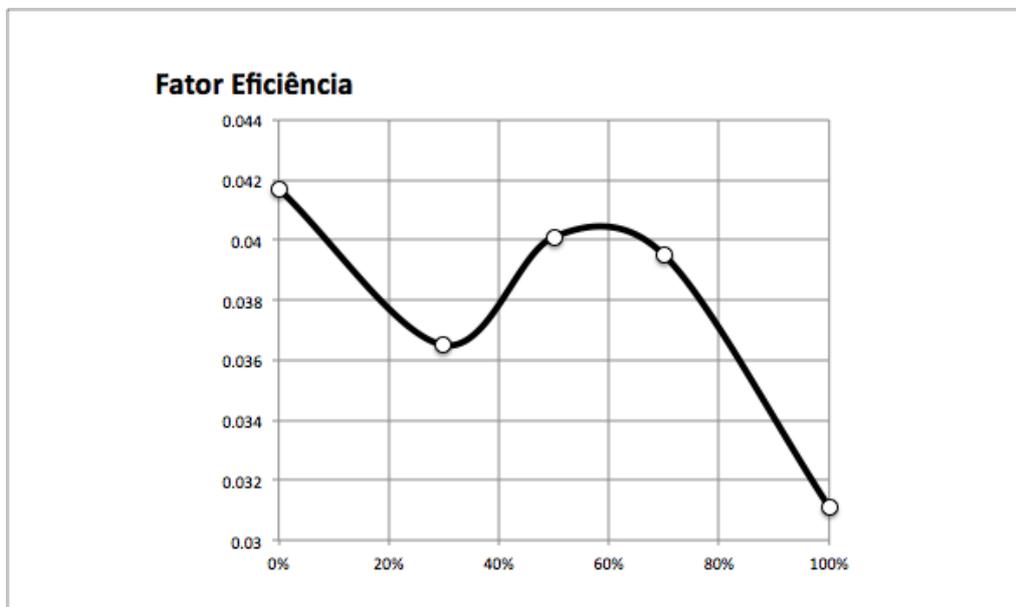
3.3.6 EPS

Pérolas de poliestireno expandido, ou EPS, é um produto sintético proveniente do petróleo. Este derivado possui inúmeras características físicas relevantes à construção civil, dentre elas destacam-se: a massa específica (entre 10 e 30 kg/m³), a resistência ao envelhecimento, e pouca solubilidade em água.

Segundo ROSSIGNOLO (2009), “A alta quantidade de água absorvida pelos agregados pode ser desfavorável a algumas propriedades do concreto no estado endurecido, como o aumento da retração por secagem, o aumento da massa específica e a redução da resistência ao fogo.”. Com isso, a adição de EPS além de representar um método de redução da massa específica do concreto, é capaz de diminuir a água absorvida por materiais secos.

Além disso, foi observado no artigo “Estudo comparativo entre argila expandida e poliestireno expandido em concreto leve de alto desempenho (CLAD)” (ANDRADE; CARVALHO; AGUIAR; DIAS, 2016), que tem o mesmo traço inicial desta monografia, o ponto ótimo do fator de eficiência em 60% dos agregados de dimensão 2,4 mm por EPS de 2,4 mm, como pode ser visto na figura 15.

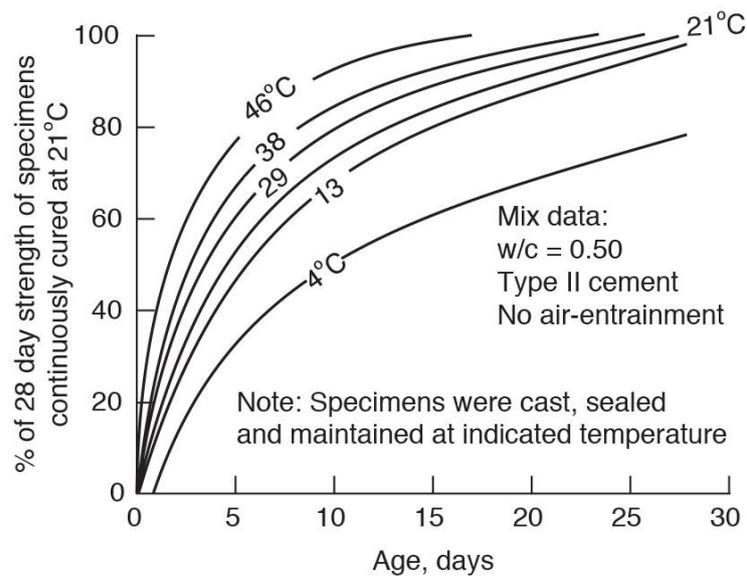
Figura 15: Fator de Eficiência (F_{ck} / massa específica) versus substituição de EPS de 2,4 mm por agregado de 2,4 mm (ANDRADE; CARVALHO; AGUIAR; DIAS, 2016).



3.3.7 CURA

A cura do concreto pode ser definida como as condições necessárias para hidratação do cimento e formação do gel de silicato de cálcio hidratado (CSH). Essas condições são: umidade, tempo, e temperatura. A umidade, devido a porosidade da pasta, pode fazer com que o concreto perca água capilar para o ambiente caso a umidade relativa seja inferior a 80%, desfavorecendo seu ganho de resistência. O tempo, diz respeito ao período necessário para a produção de CSH a partir do C_3S e C_2S , visto que estes tem velocidade de reação diferente. A temperatura é fundamental na determinação da velocidade da formação de CSH como em qualquer reação química exotérmica (ver Figura 16). Assim, foi apenas investigado o efeito da cura a 45°C, por limitações da estufa, em alguns dos 47 traços realizados.

Figura 16: Resistência à compressão versus tempo em dias para curas a diferentes temperaturas (Fonte MEHTA e MONTEIRO 2006).



4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 SUBSTITUIÇÃO DE EPS

Foram realizados 4 traços (EPS1, EPS2, EPS3, EPS4), todos partindo do traço piloto diferindo apenas nas proporções volumétricas de EPS para agregados de 2,4 mm. O traço piloto teve uma considerável diferença na sua resistência a compressão quando reproduzido durante esta monografia, possivelmente causada pela mudança de fornecedores de cimento, sílica ativa e agregados. Desse modo, os traços representam iterações buscando a porcentagem ótima de EPS de 0,6 mm, que foi 60%, ver tabela 4.

Tabela 4: Substituição parcial do agregado de 2,4 mm por micropérolas de 0,6 mm de poliestireno expandido.

EPS			
traço:	Quantidade de micropérola (% Substituída da Granulometria 2,4mm)	Fck(MPa)	peso específico
Piloto	0	71,7	1837
		74,1	1837
		77,75	1858
EPS1	30	67,1	1806
		68,8	1795
		72	1801
EPS2	60	69,6	1764
		66,7	1754
		68,6	1749
EPS3	70	62,8	1754
		68,8	1743
		67,8	1754
EPS4	100	55,1	1712
		52,2	1707
		48,9	1702

4.2 ADIÇÃO DE FILLER

A otimização do conteúdo de filler no traço de CLAD, foi feita através da comparação sucessiva entre pares de traços, diferindo apenas na quantidade de filler de pó de quartzo. Foi utilizado este tipo de análise em pares, para ser mais eficiente na quantidade de variáveis observadas. Por exemplo, o traço A é o traço piloto com substituição de 70% do agregado de 2,4 mm por EPS de 2,4 mm, e o traço A-F é o traço A com adição de filler. Dessa forma, mesmo que a variável explorada no traço A não tenha sido aproveitada no estudo de otimização, este traço serviu para comparar informações a respeito do conteúdo de pó de quartzo no CLAD. Assim, a porcentagem ótima de filler pó de quartzo foi 13%, ver tabela 5.

Tabela 5: Comparação da adição de pó de quartzo a 4 traços controle diferentes, em proporções distintas.

Adição de Filler			
Traco:	Quantidade de filler (% Material Cimentício)	Fck(MPa)	Peso específico(kg/m ³)
A	0	62,6	1775
		57,8	1743
		59,4	1743
A-F	5	64,6	1764
		58,2	1754
		60,4	1743
B	0	59,6	1723
		60,1	1712
		58	1743
B-F	7	61,6	1692
		61,2	1712
		60,6	1723
C	0	52,8	1662
		55	1665
		53,4	1660
C-F	13	62,6	1650
		61,7	1640
		61,6	1629
D	0	40,6	1702
		43,1	1712
		46,2	1733
D-F	15	43,12	1712
		47,91	1723

		47,91	1712
--	--	-------	------

4.3 CURA TÉRMICA

Da mesma forma que a otimização do conteúdo de filler foi observado, o efeito da cura térmica a 45 ° C foi avaliado em pares de traços, devido a questões de produtividade no laboratório. Neste caso, os traços E, F e G foram traços que investigavam outras variáveis, e os traços E-T, F-T e G-T são os respectivos traços com cura térmica. Logo, foi possível verificar os benefícios da cura térmica a 45 °C, ver tabela 6.

Tabela 6: Comparação do uso entre cura térmica e cura em câmara úmida.

Traço	Cura	Temp(°C)	Fck(MPa)	Peso específico(kg/m³)
E	Úmida	28	50,6	1686
			54,5	1712
			52,4	1723
E-T	Térmica	45	64,6	1660
			58,2	1681
			60,4	1681
F	Úmida	28	55	1686
			50,2	1702
			58	1728
F-T	Térmica	45	61,6	1692
			66,2	1712
			60,6	1723
G	Úmida	28	52,4	1671
			50	1650
			50,8	1650
G-T	Térmica	45	64,6	1660
			60,7	1660
			61,6	1650

4.4 TRAÇO FINAL

Finalmente, aplicando o resultado das variáveis de otimização simultaneamente, foi determinado o traço final de CLAD e suas propriedades (ver tabela 7, 8 e 9).

Tabela 7: Traço unitário em massa (TUM) do CLAD otimizado.

Traço:	CLAD
Cimento	1
Pó de Quartzo	0,1324
Silica	0,2
A/C	0,22
Aditivo	0,02
Agregados (argila expandida)	0,7

Tabela 8: Empacotamento do traço de CLAD otimizado.

Granulometria	Proporção	Argila expandida	EPS (#0.6)
Fundo	-	-	-
#0.15	0,1	0,1	-
#0.3	0,2	0,2	-
#0.6	0,3	0,3	-
#1.2	0,25	0,25	-
#0.24	0,15	0,06	0,09

Tabela 9: Propriedades do CLAD endurecido.

Traço:	Otimizado	Piloto	Unidade
Massa Específica (γ)	1660	1820	kg/m ³
Resistência à compressão	64,6	89,2	MPa
Resistência à tração	6,1	7,8	MPa
Consumo Cimentício	753	897	kg/m ³
Cura	45	28	°C

5 AVALIAÇÃO DE FLECHAS ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS

A avaliação foi feita utilizando o programa computacional SAP2000 v14, com quatro modelos distintos, capazes de representar a estrutura de uma laje mista de 4 por 4 metros. Inicialmente, foi modelado apenas a forma metálica com elementos de área com seção tipo shell-thin, para avaliar as deformações causadas pelo peso do concreto fresco, peso próprio e carga de circulação nos diferentes casos.

5.1 MODELAGEM

As propriedades do aço e dimensões da fôrma foram retirados do catálogo de formas metálicas da Perfilar, ver figura 17, o qual determina o uso de aço zincado ZAR280 especificado na NBR 7008 com limite de escoamento de 280 MPa e limite de resistência 380 Mpa. As propriedades do aço foram inseridos no SAP 2000 no “Yield Stress” e “Tensile Stress” respectivamente, ver figura 18. As características da seção da fôrma, como: espessura, ângulo e tipo foram inseridos na section data, ver figura 19. Dessa forma foi possível modelar, com elementos de área, uma fôrma de perfil metálico (ver figura 20).

Figura 17: Perfil da fôrma metálica – (Fonte Perfilar 2018).

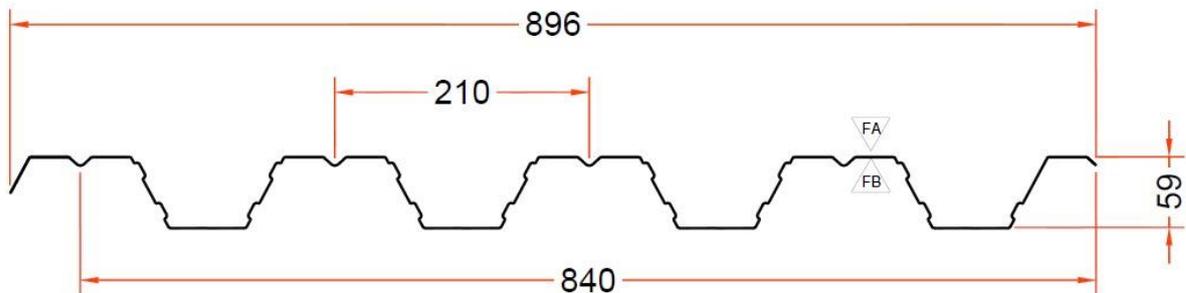


Figura 18: Propriedades inseridas no elemento de forma Sap2000.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Material da Forma

Material Type: Steel

Material Notes:

Weight and Mass

Weight per Unit Volume:

Mass per Unit Volume:

Units:

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E:

Poisson's Ratio, U:

Coefficient of Thermal Expansion, A:

Shear Modulus, G:

Other Properties for Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy:

Minimum Tensile Stress, Fu:

Effective Yield Stress, Fye:

Effective Tensile Stress, Fue:

Switch To Advanced Property Display

Figura 19: Tipo de seção usada na análise da deformação da fôrma.

Shell Section Data

Section Name

Section Notes

Display Color

Type

- Shell - Thin
- Shell - Thick
- Plate - Thin
- Plate Thick
- Membrane
- Shell - Layered/Nonlinear

Material

Material Name

Material Angle

Thickness

Membrane

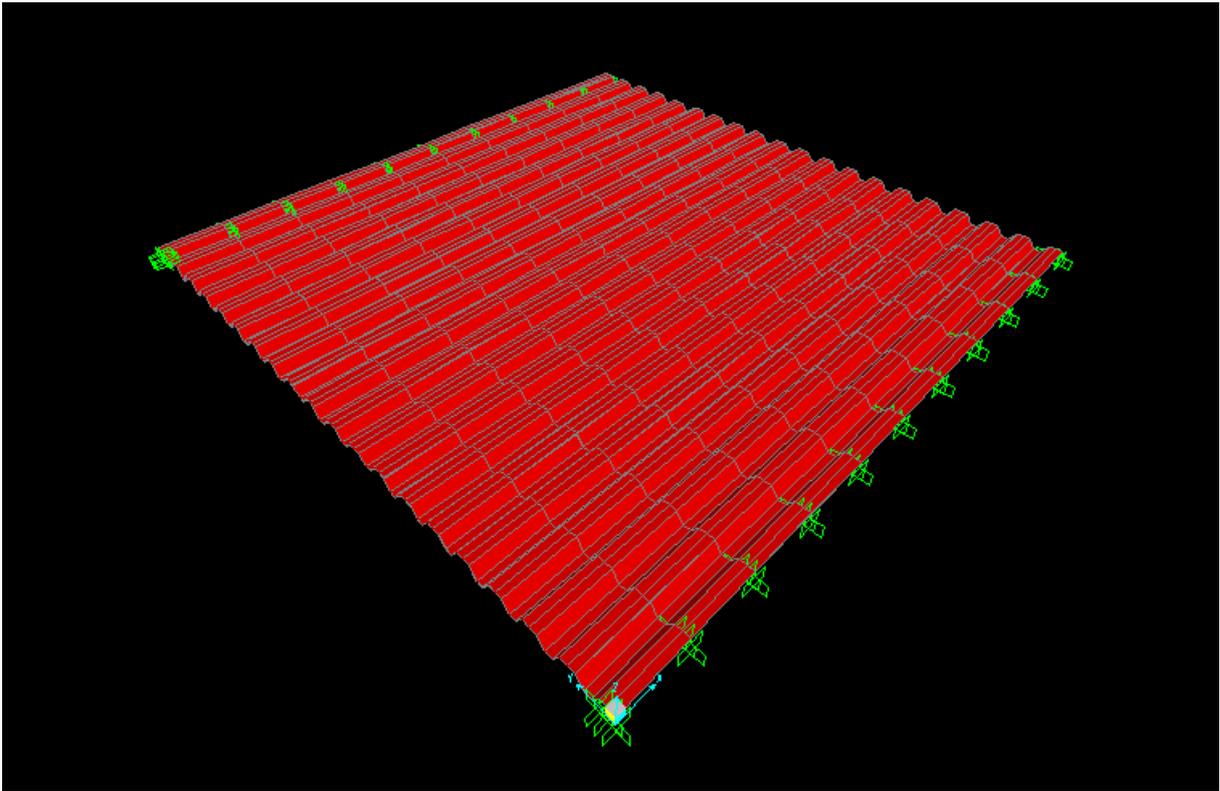
Bending

Concrete Shell Section Design Parameters

Stiffness Modifiers

Temp Dependent Properties

Figura 20: Modelo de elementos finitos da fôrma metálica 4 x 4 m.



Em um segundo momento, foi pré-dimensionado utilizando o EUROCODE 4, a espessura de três lajes engastadas em dois lados de 4 x 4 m com carga de utilização igual a 4 kN/m² para CLAD, um concreto de uso geral (CUG) e um concreto de alto desempenho (CAD). Para estes três tipos de concreto, foram utilizadas as propriedades descritas na tabela 10, ver figura 21 e 22. Embora seja esperada uma diferença no módulo de elasticidade nestes três tipos de concreto, por falta de instrumentação no laboratório, este parâmetro não pôde ser avaliado experimentalmente, foi mantido valor dado pelo SAP2000. Logo, nas propriedades dos materiais foram alterados apenas a densidade e resistência à compressão.

Utilizando as fórmulas fornecidas discutidas no pré-dimensionamento de lajes mistas, foram obtidas as seguintes espessuras do topo da laje à fôrma (h_c): 5 cm, 8 cm, e 6 cm respectivamente. Estes valores foram usados para calcular as cargas distribuídas na fôrma devido aos concretos no estado fresco, e dimensionar os modelos de elemento finito das lajes mistas, ver figura 23. Possibilitando assim, analisar as flechas desses modelos. Diferentemente do modelo da forma metálica, foi utilizado elementos de tipo sólido na modelagem das lajes, devido à presença de diferentes materiais (aço e concreto) ao longo de sua seção.

Tabela 10: Lajes Pré-dimensionadas utilizadas na análise de flechas.

Tipo de Concreto	Densidade (kg/m ³)	Fck (Mpa)	Espessura Pré-dimensionada(cm)
CLAD	1660	64,6	5
CUG	2400	60	8
CAD	2600	40	6

Figura 21: Propriedades usadas no CLAD.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: concreto leve ■

Material Type: Concrete

Material Notes:

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 1660

Mass per Unit Volume: 169,2729

Units

Kgf. m. C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2,039E+10

Poisson's Ratio, U: 0,3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G: 7,842E+09

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 6587367,

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

Figura 22: Propriedades usadas no concreto de uso geral.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: concreto de uso Geral 

Material Type: Concrete

Material Notes:

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2400,

Mass per Unit Volume: 244,7319

Units: **Kgf. m. C**

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2,039E+10

Poisson's Ratio, U: 0,3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G: 7,842E+09

Other Properties for Concrete Materials

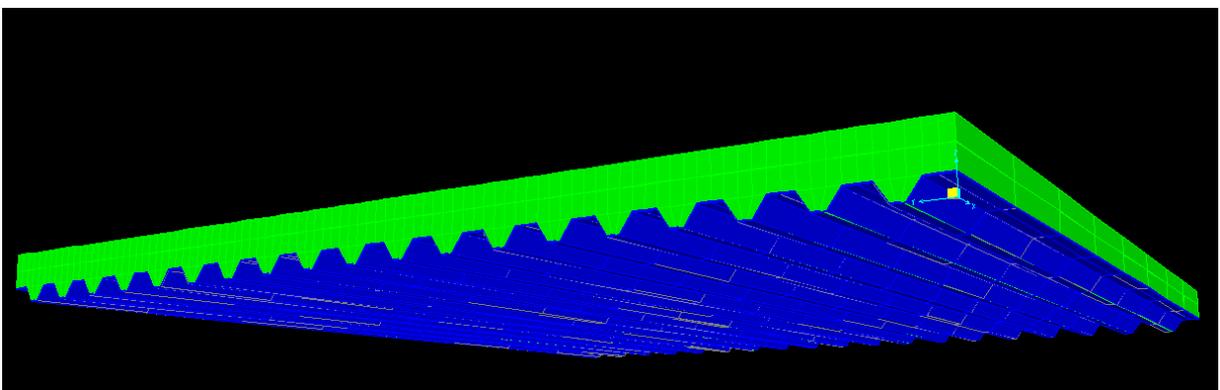
Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 4078865,

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

Figura 23: Modelo de elementos finitos da laje mista com CLAD.



5.2 FLECHAS NA FÔRMA METÁLICA

Através do modelo de elementos finitos foram avaliadas as deformações da fôrma metálica simplesmente apoiada em todo seu perímetro, e variando a quantidade de apoios no interior do vão da laje, variando sua área não apoiada, para encontrar a quantidade mínima de escoras que garantem uma flecha máxima inferior a $L/500$, ou seja, 8 mm. Dessa forma foi possível visualizar as deformações (ver figuras 24, 25, e 26), e como era esperado, determinar que a melhor forma de escorar a fôrma é transversalmente às nervuras (ver tabela 11).

Figura 24: Modelo de elementos finitos da fôrma escorada 4 x 2 m, com escoras transversais às nervuras da fôrma.

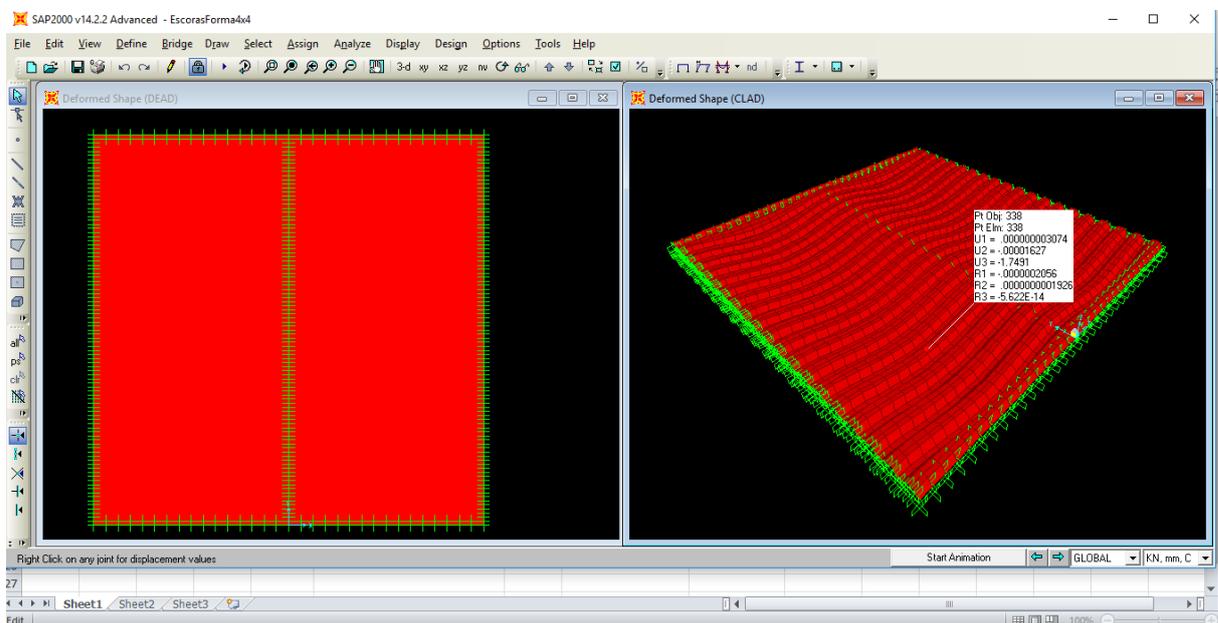


Figura 25: Modelo de elementos finitos da fôrma escorada 4 x 4 m.

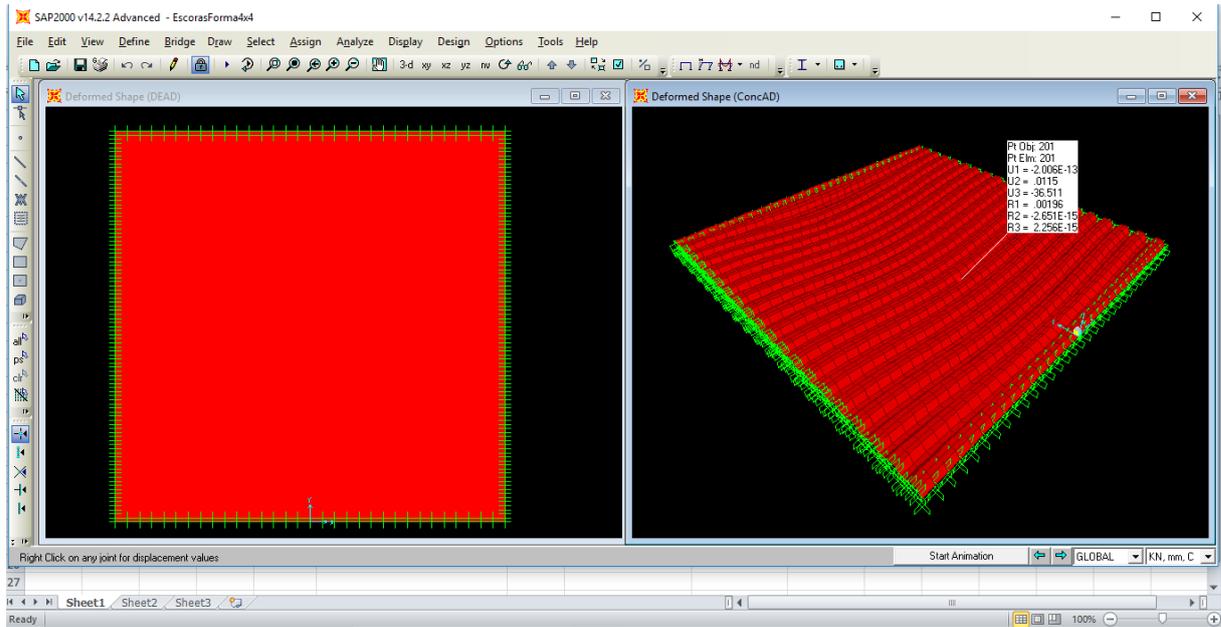


Figura 26: Modelo de elementos finitos da fôrma escorada 2 x 4 m, com escoras ao longo da nervura da fôrma.

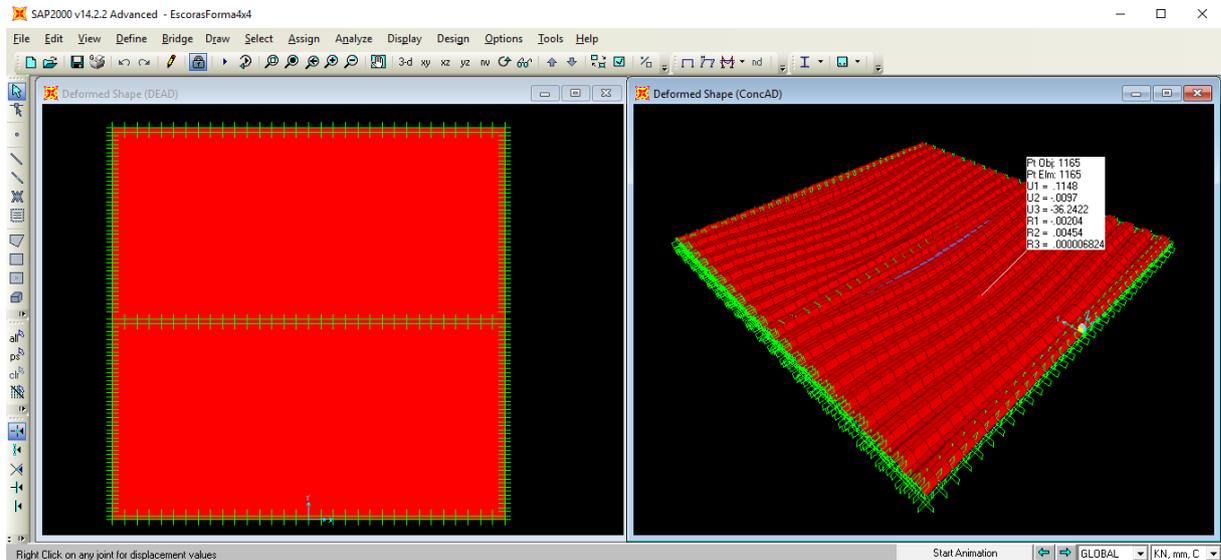


Tabela 11: Área não escorada da fôrma metálica versus flecha máxima.

Área livre (m x m)	Flecha(mm)	Concreto
4 x 4	26,5	CLAD
4 x 4	41,6	CUG
4 x 4	36,3	CAD
4 x 2	1,75	CLAD
4 x 2	2,63	CUG
4 x 2	2,34	CAD
2 x 4	26,33	CLAD
2 x 4	41,6	CUG
2 x 4	36,6	CAD

Logo, podemos determinar que para todos os tipos de concretos avaliados, as escoras devem formar áreas de 4 x 2 m transversais às nervuras da fôrma metálica. Caso as escoras sejam dispostas ao longo das nervuras (2 x 4 m), as deformações serão consideravelmente superiores às toleráveis nesta laje.

5.3 FLECHAS NA LAJE

As modelagens das três lajes de concreto, CLAD, CUG e CAD, foram capazes de nos dar as deformações em cada ponto das lajes, ver figura 26 e 27. Sendo a flecha máxima para laje mista com: CLAD igual a 1,27 mm, com CUG igual a 2,25 mm, e CAD igual a 2,33 mm.

Figura 26: Deformação devido à carga de utilização na laje mista com CLAD.

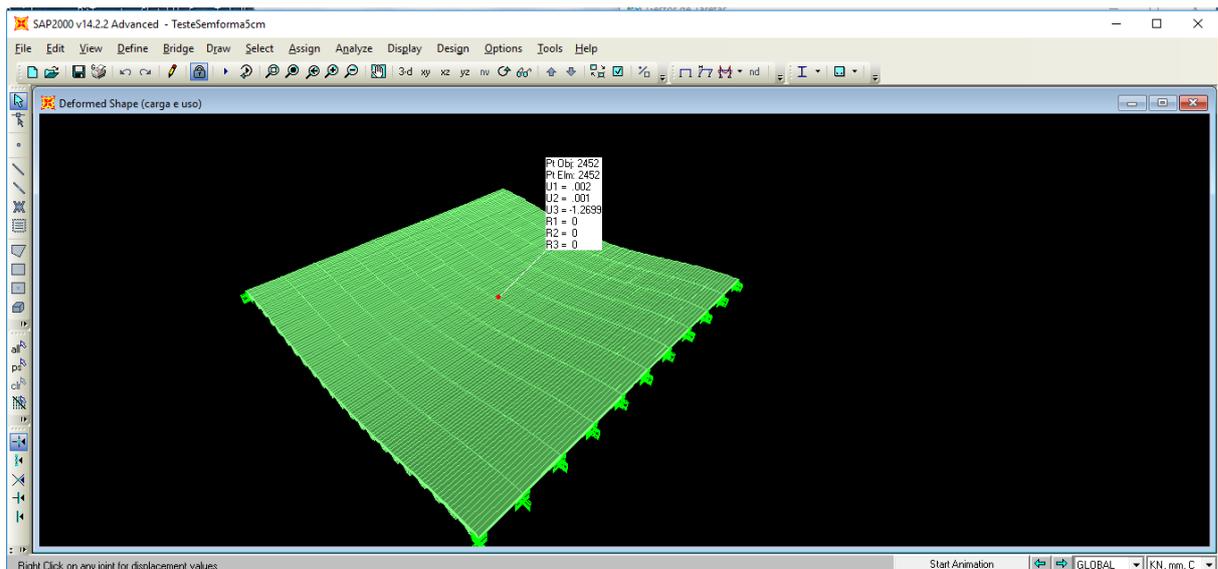
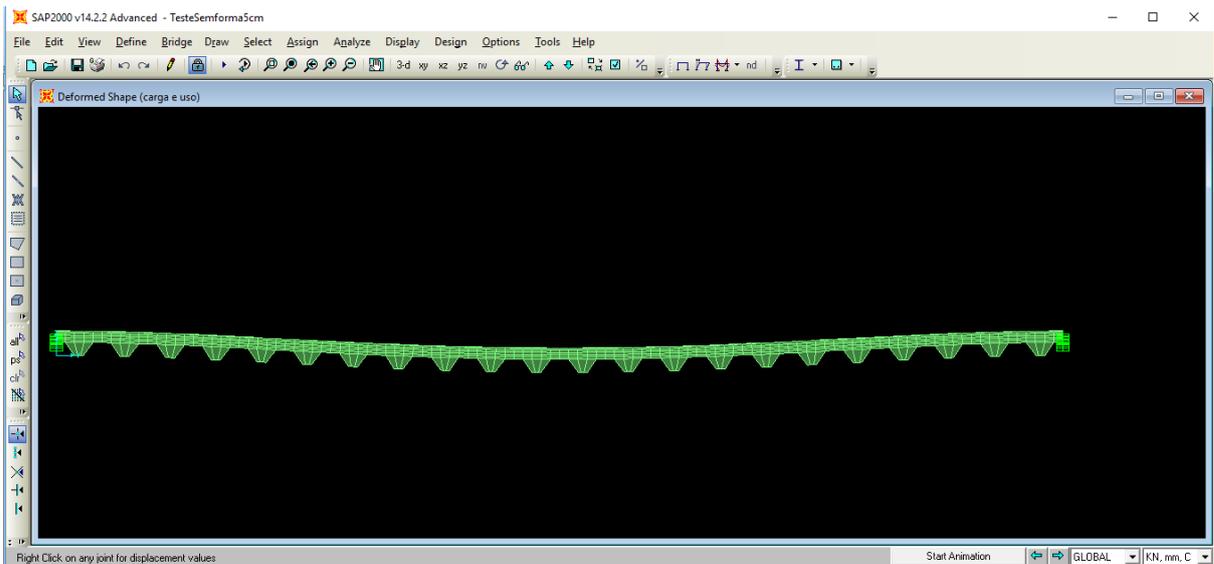


Figura 27: Vista frontal da deformação da laje mista com CLAD.



6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao isolar diferentes parâmetros de otimização, tais como como: adição de EPS, adição de pó de quartzo, e cura térmica, foram fundamentais para a análise prática do traço de concreto leve de alto desempenho. Esta divisão proporcionou uma análise mais rápida e mais abrangente.

O traço final teve densidade 1660 kg/m^3 , resistência à compressão $64,6 \text{ MPa}$ aos 28 dias, resistência à tração $6,1 \text{ MPa}$, e consumo de cimento de 745 kg/m^3 , cura térmica a 45° C , 60% dos agregados de argila expandida $2,4 \text{ mm}$ substituídos por EPS de $0,6 \text{ mm}$ e 13% de filler de pó de quartzo.

Ao aplicar as propriedades do CLAD desenvolvido na parte prática desta monografia às lajes mistas em estruturas altas, por meio de elementos finitos no SAP2000, foi possível determinar vantagens na sua aplicação se comparada com concreto de uso geral e concreto de alto desempenho. Dentre essas vantagens destacam-se: redução no peso próprio de toda estrutura; redução na espessura de concreto da laje e diminuição da flecha máxima. O peso próprio a cada metro quadrado de laje com o CLAD desenvolvido teve cerca 110 kg a menos se comparado ao concreto comum, e 75 kg a menos se comparado ao CAD dimensionado para a mesma laje.

As desvantagens a respeito do uso de CLAD otimizado, são: dificuldade de dosagem em situ, uso amplo de sílica ativa, e necessidade de 45° C na cura. Primeiramente, o CLAD otimizado apenas utiliza argila expandida em granulometrias específicas, ou seja, em larga

escala pode ser difícil de reproduzir. Além disso, a sílica ativa é um material altamente carcinogênico e seu uso não supervisionado pode causar danos permanentes à saúde. Finalmente, a cura térmica em situ pode se tornar inviável dependendo de onde se estiver construindo.

Desta forma concluímos que o emprego deste CLAD em lajes mistas pode ser uma alternativa bastante atrativa para construções de grandes alturas, desde que seu uso seja devidamente estudado e planejado de forma a minimizar suas desvantagens.

REFERÊNCIAS

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EUROCODE 4:1994, Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules for buildings.

BAKER, W. F. BROWN, C. PAWLIKOWSKI, J. J. RANKIN, D. S. Tall Buildings and Their Foundations: Three Examples. Artigo. Construção Civil. Missouri University of Science and Technology. 2013.

ALVA, Gerson. Sobre o Projeto de Edifícios em Estrutura mista Aço-concreto. Monografia(Pós-Graduação). Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo. 2000.

ANDRADE, M. CARVALHO, B. AGUIAR, A. DIAS, M. Estudo comparativo entre argila expandida e poliestireno expandido em concreto leve de alto desempenho (CLAD). Artigo. Materiais. Universidade Federal de Pernambuco. 2016.

VANDERLEI, R. D. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739:2007, Concreto-Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118:2004, Projeto de estruturas de concreto - procedimento.Rio de Janeiro, 2004.

CARDOSO, Nuno. Dimensionamento e comparação de custos de execução de lajes a grande altura com soluções tradicionais escoradas e em estrutura mista aço betão. Monografia(Pós-Graduação). Construções. Universidade do porto. 2013.

CARVALHO, B. ANDRADE, M. Otimização de concreto leve de alto desempenho. Artigo. Materiais. Universidade Federal de Pernambuco. 2016.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M.. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 3ªed. McGraw-Hill, 2006.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 2ª ed. São Paulo: Pini. 1997.

GOLDENBERG PY, LUCAS. Potencial de uso de resíduo de polimento de porcelanato como material cimentício suplementar na substituição parcial do cimento portland. Monografia (Graduação). Materiais. Faculdade de Engenharia Civil do Centro Universitário Ritter dos Reis. Porto Alegre. 2017

ROSSIGNOLO, J.A. Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura aplicações. São Paulo: Pini. 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 11768:2011, Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

MEHTA, P. K. AÏTCIN, P. C. Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete. In: High-Strength Concrete – Second International Symposium. ACI, 1990

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7008-1:2012, Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente- Especificação. Rio de Janeiro, 2012.