



COBERTURA VERDE LEVE (CVL): ENSAIO EXPERIMENTAL

Francisco Vecchia

Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo

EESC USP

☎(16) 3373-9540 - (16) 3373-9550 FAX

Avenida Trabalhador San carlense, 400

13.566-590 – São Carlos - SP

fvecchia@sc.usp.br

RESUMO.

O principal objetivo deste artigo é o de apresentar os resultados experimentais do comportamento térmico de uma Cobertura Verde Leve (CVL), comparando-o com os sistemas tradicionais de cobertura existentes no Brasil. Além disso, o artigo descreve sucintamente o sistema construtivo proposto para telhados verdes, de característica leve, com a utilização de materiais que provoquem o menor impacto ambiental, de caráter sustentável, que permitam, além disso, a introdução de sistemas de reuso de água e do atraso do escoamento das águas de chuva (*runoff*) que, quase sempre, provocam enchentes no meio urbano.

ABSTRACT.

The main goal of this paper is to present results on a field experimental about light green roofs thermal behaviour, face others traditional roof covering system. Beside, in one hand, intend to describe shortly the constructive system of a light green roof, which has a sustainable character building materials and, in other, worried with the water reuse and with the run off delay. The experimental results from internal air temperatures measurements shows that the green roofs applied to warm and dry climates also provides an interesting time lag with surface and internal air temperature reduction.

1 INTRODUÇÃO.

Em todo o país o crescente e rápido processo de urbanização tem acarretado diversos sinistros, como as enchentes observadas nas estações de primavera e verão, o aumento da temperatura em escala micro e mesoclimática, ilhas de calor urbano, o efeito estufa, a falta de água nas grandes cidades. A preocupação com os aspectos ambientais e de sustentabilidade na sociedade de forma geral tem levado ao desenvolvimento de tecnologias de construção com menor impacto ambiental. Buscando amenizar esses problemas está sendo desenvolvida na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, ampla pesquisa sobre Coberturas Verdes Leves (CVL's) que envolve três áreas distintas de estudo: 1.) comportamento térmico; 2.) sistema construtivo de característica leve e de 3.) reuso e de retardamento do escoamento de águas de chuva por meio de coberturas verdes leves (CVL).

2 MATERIAL E MÉTODOS.

2.1. Método Construtivo. O projeto sobre coberturas verdes leves (CVLs) proposto tem por objetivo utilizar materiais e métodos que provoquem o menor impacto ambiental em todas as etapas de construção e ao longo da vida útil do edifício. Para a sua avaliação foi proposto a instalação experimental de telhado verde, de característica leve, utilizando materiais renováveis, a exemplo do impermeabilizante a base de óleo vegetal (resina poliuretana PU) de mamona (*Ricinus communis*). Além dos aspectos construtivos sustentáveis, a aplicação das CVLs tem por objetivo contribuir à eficiência energética dos edifícios, por meio da redução do condicionamento eletro-mecânico; atender aos requisitos do Conforto Ambiental minimizando os valores da temperatura interna do ar e das temperaturas superficiais sistema

de cobertura. Esses dois aspectos, eficiência energética e conforto ambiental, por sua vez, aspectos do Desenvolvimento Sustentável, igualmente contribuem para reduzir problemas de saúde (respiratórios) e para o aumento da produtividade, intelectual ou não, por meio da promoção de condições adequadas no trabalho (escolas, fábricas e escritórios, hospitais e postos de saúde), sobretudo, para edifícios que procurem reduzir os seus custos de operação. O conjunto que compõe a cobertura verde leve (CVL) é formado pelo substrato (grama com terra vegetal); pela geomanta e por uma camada impermeabilizante. Esse conjunto deve ser colocado sobre qualquer estrutura de apoio (laje pré-moldada cerâmica, estrutura de madeira, laje concreto normal ou de alto desempenho, etc.). Na figura 1, a seguir, está disposta a estrutura utilizada no ensaio de avaliação, no qual o sistema de cobertura verde foi colocado sobre uma laje pré-moldada cerâmica.

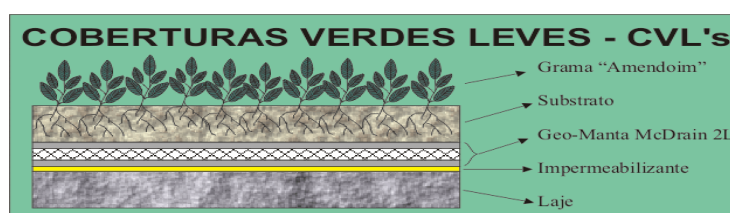


Fig. 1 - Diversas camadas de uma Cobertura Verde Leve (CVL).

2.1.1 Sistema Construtivo Leve. O projeto foi idealizado para se constituir em elemento de menor peso próprio possível, com a menor sobrecarga sobre os elementos de cobertura, dos pilares e da fundação do edifício. Os estudos preliminares indicam possível equivalência entre o peso da cobertura verde leve (CVL) e o peso do conjunto estrutura e telhas cerâmicas. Descrição das etapas práticas de implantação de um sistema de cobertura verde leve (CVL):

2.1.2 Impermeabilização Ecologicamente Correta. Aplicou-se uma pasta de cimento com látex sobre a superfície de concreto da laje pré-moldada, para aumentar a aderência da resina vegetal impermeabilizante. Também foi aplicado o impermeabilizante de óleo vegetal (*Ricinus communis*) com os devidos cuidados para evitar a penetração de água e de possíveis agentes agressivos que atacam as armaduras do concreto causando corrosão, ou mesmo, ultrapassar a laje pré-moldada provocando goteiras e a formação de fungos e de mofo. O impermeabilizante composto de resina vegetal (obtida pro meio de parceria com a empresa Construquil Polímeros Indústria e Comércio Ltda) derivada do óleo de mamona (*Ricinus communis*), constitui-se em produto obtido a partir de recurso renovável, não tóxico, que não provoca prejuízos ao meio ambiente ou à saúde de quem a manipula ou de quem a utiliza na fase de ocupação. Esse tipo de resina impermeabilizante possui peculiar importância devido a sua aplicabilidade no âmbito dos denominados plásticos de engenharia, representando promissor campo de pesquisa de novos materiais de construção. Isso se torna possível por ser a resina poliuretana um material nobre, de alta resistência mecânica e por se constituir em sistema de polímeros versátil para aplicações em diferentes setores da Indústria.

2.1.3 Drenagem e Geocomposto. O elemento drenante MacDrain 2L (obtida por meio de parceria com a empresa Maccaferri) é um geocomposto utilizado para drenagem, de característica leve e flexível, cujo núcleo drenante é formado por geomanta tridimensional, composta por filamentos de polipropileno, com espessura entre 10 e 18 mm e termosoldada entre dois geotêxteis resinados, não-tecidos, a base de poliéster em todos os pontos de contato. Geocomposto é a nomenclatura técnica adotada para definir produtos constituídos pela combinação de dois geossintéticos (no caso, a geomanta tridimensional do núcleo e o geotêxtil do filtro) que, em suma, trata-se de denominação genérica de produto polimérico, industrializado, cujas propriedades contribuem para melhoria de obras geotécnicas, desempenhando funções de reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial.

2.1.4 Gramínea. Para a gramínea foi utilizada no experimento a grama esmeralda (*Paspalum notatum*, doada por NC Floricultura), pois é resistente à ação dos raios solares e ao

pisoteamento. Ressalte-se que existe a possibilidade de ser utilizado outros tantos e diferentes tipos de vegetação rasteira, como a grama amendoim (*Arachis repens*) que também é muito resistente ao sol pleno e ainda exige menor quantidade de substrato, pois absorve o nitrogênio do ar, fixando-o no substrato.

2.2 Análise climática e do comportamento térmico de sistema CVL. A abordagem climática adotada para o experimento que definiu o dia experimental está baseada nos critérios da Climatologia Dinâmica, uma vez que foi incorporado ao estudo experimental o estado atmosférico dominante no período de análise. Além disso, o experimento utilizou como referência as Normais Climatológicas 1961 – 1990, publicado em 1992, pelo então Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Departamento Nacional de Meteorologia. No experimento realizado no Canteiro Experimental da Escola de Engenharia de São Carlos, Prefeitura do Campus de São Carlos, Universidade de São Paulo, foi considerado o episódio de 04 a 10 de outubro 2004, dias em que a região Noroeste do estado de São Paulo esteve sobre o domínio de uma massa de ar quente e seca.

Pode-se considerar que os valores registrados pelas Estações Meteorológicas nada mais são do que registros de propriedades da massa de ar atuante (fase de domínio) na região. Esses valores dos elementos climáticos possivelmente contem as modificações impostas pelos fatores geográficos de modificação (altitude, latitude e longitude, entre outras condições fisiográficas) das condições iniciais do clima (ou das referidas massas de ar que invadem a região). Particularmente a esse episódio climático adotado, na cidade de São Carlos, os valores da temperatura do ar exterior atingiram elevados índices, com a temperatura máxima, do dia 9 de outubro, ultrapassando o valor das médias máximas históricas para esse mês que é de 24.7^oC, segundo as Normais Climatológicas de 1961–1990. Apenas ficando abaixo da temperatura máxima absoluta registrada em 12 de outubro de 1963, quando foi anotado o valor de 36.4^oC. No dia, 9 de outubro, a umidade relativa do ar atingiu o valor de 15%, um dos mais reduzidos até então registrados. Na região Noroeste do estado de São Paulo os valores variaram ao redor desse número, tendo atingido valores menores em cidades vizinhas, a exemplo de Ribeirão Preto, segundo os jornais. Os valores apontados pelas Normais Climatológicas 1961–1990 registram umidade relativa para o mês de outubro o valor de 80%, o que não pode ser considerado como valor referenciado, uma vez que destoa das características de inverno seco com baixo índice de precipitação total de 157.8mm, cerca de 10% do total anual que é de 1495.1mm e que provavelmente provem de erro na digitação da referida Normal.

A região de São Carlos pode ser classificada como de verão chuvoso e inverno seco. De acordo com a clássica classificação de Köppen (1900). O clima sancarlense é do tipo Cwa, clima quente com inverno seco. A cidade de São Carlos está localizada a 22^o 01' de latitude Sul e 47^o 53' de longitude Oeste, apresenta cotas altimétricas na faixa de 890 metros. O clima sancarlense sob a ótica dinâmica do clima se caracteriza por uma região de passagem de frentes frias ao longo de todo o ano. Segundo Monteiro (1967), pode-se dividir o domínio das massas de ar atuantes, nessa região, em duas etapas principais, denominadas em Pré e Pós Frontal que, por sua vez, também se subdividem em outras duas fases, respectivamente, prenúncio e avanço. Essas duas fases que antecedem à penetração de uma massa Polar Atlântica (mPA) de característica quente. Posteriormente, ocorrem as fases de domínio e transição. Nessas duas últimas predominam as condições do tempo impostas pela massa Polar Atlântica (mPA), de característica fria e, às vezes, úmida. Essa divisão é profícua, pois, de acordo com a necessidade de análise climática voltada ao comportamento térmico, pode-se determinar a fase mais apropriada ou mais adequada à realização dos experimentos. No caso da presente investigação o período escolhido foi o da fase de prenúncio e de avanço da massa Polar Atlântica (mPA), uma vez que nessas situações (que antecedem ao avanço de uma frente fria) ocorre um sobre-aquecimento do ar, na região a ser penetrada, pela frente, elevando os valores da temperatura do ar exterior e, ainda, ocorrendo conseqüente diminuição

dos valores da umidade relativa do ar. Outras alterações nos elementos climáticos também são possíveis de se notar como alteração no regime de ventos predominantes, interrupção da senóide da pressão barométrica, alteração na nebulosidade e na formação de nuvens, entre outras. A partir dessa compreensão baseada na abordagem dinâmica do clima, pode-se obter então a definição de episódios representativos, segundo Vecchia (1997), nos quais são consideradas as propriedades das massas de ar que atuam sobre determinado lugar. Dessa forma, entende-se como funciona o clima, a partir da compreensão da circulação geral e regional da atmosfera, aproximando-se da definição de clima adotada pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) de que o clima pode ser definido como a totalidade de elementos meteorológicos que, em suas sucessões habituais e em um dado período, caracteriza o estado da atmosfera.

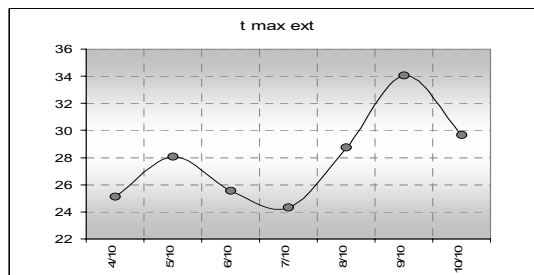


Fig. 2 – Gráfico contendo as temperaturas do ar exterior, máximas diárias, do episódio climático escolhido, de 4 a 10 de outubro de 2004. O dia 9/10, que antecede a penetração da frente fria se apresenta como o sobre-aquecimento, conforme mostra a figura.

O mês de outubro de 2004 foi marcado pelo avanço de, pelo menos, três sistemas atmosféricos, que atuaram sobre a região. O mais perceptível deles foi o de 4 a 11 de outubro, que foi tomado como episódio de referência e de onde se extraiu o dia representativo do período. Esse dia foi escolhido devido as suas características de notável calor e de reduzida umidade relativa do ar. O episódio de 4 a 10 de outubro claramente expressa as etapas Pré e Pós Frontais, qualificando-se como episódio entre dois sistemas atmosféricos (frentes) atuantes na região sancarlense, quando a partir do dia 4 de outubro, sob o domínio de uma massa Polar, de fraca intensidade, inicia sua fase de tropicalização. Nos dias subsequentes ocorre então a formação de uma massa Tropical, de característica quente e seca, até atingir o seu ápice no dia 9 de outubro, que antecede a penetração de uma nova frente fria. Esse dia se caracteriza pelo seu sobre-aquecimento, normal nos dias e momentos que antecedem à penetração de uma frente fria, tendo em sua retaguarda uma massa Polar Atlântica, conforme se pode confirmar pelos valores do dia 9 de outubro ($t_{max} = 34.04^{\circ}C$) e, da mesma forma, pela imagem do satélite GÓES, na figura 17. Os dias posteriores ao episódio escolhido não foram considerados por que não apresentam interesse para o estudo do comportamento térmico de sistemas de cobertura, em particular, em sua reação frente ao calor. Esses dias se caracterizaram pela lógica diminuição dos valores da temperatura do ar e do conseqüente aumento dos valores da umidade relativa do ar exterior. A seqüência de imagens de satélite (GÓES; CPTEC INPE, 2004) compreendendo os dias 04 a 10 de outubro de 2004, evidenciam o domínio dessas massas de ar sobre a região de São Carlos. Na figura, a seguir, a imagem do dia 09/10.

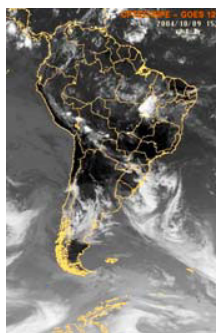


Fig 3 - Dia 9 de outubro. Pré-Frontal e início do Avanço da frente fria tendo em sua retaguarda uma massa Polar Atlântica. O valor da temperatura máxima registrada foi de 34.04°C. As áreas brancas representam nuvens e são mais frias, ao contrário das escuras são mais quentes e representam condições de céu limpo (Fonte: INPE).

Por meio do gráfico, a seguir, se podem verificar os valores horários das temperaturas externas do ar, tomadas de forma automática (registrador CR10x Campbell Scientific Inc.) a cada 20 segundo e totalizadas em médias de 30 minutos em 30 minutos.

2.3 Ensaio experimental. Análise do comportamento térmico de sistema CVL. Os procedimentos metodológicos adotados para o estudo do comportamento térmico de diferentes sistemas de cobertura incluíram a utilização de dois sistemas automáticos para aquisição dos principais dados meteorológicos e dos registros necessários ao comportamento térmico dos sistemas de cobertura, existentes em protótipos em escala real (2.30 x 2.70 x 2.60m) construídos no Campus de São Carlos, da Universidade de São Paulo. Todos os protótipos possuem piso de concreto (tipo *radier* com 0.15m de espessura), paredes de tijolo cerâmico (0.20 x 0.10 x 0.05m) maciço com 0.10m de espessura pintadas de cor branca e, completam a construção, portas e janelas de madeira voltadas respectivamente para as fachadas Sul e Norte. As únicas variações introduzidas se referem aos tipos distintos de sistemas de cobertura. Foram comparados no presente estudo os sistemas mais comumente utilizados, no Brasil, que são as coberturas de telhas cerâmicas, de telhas de fibrocimento, de telhas de aço galvanizado, junto a outro sistema comum na América Latina, que é a laje cerâmica sem a colocação de telhas. Nesse caso foi construída uma laje pré-moldada com vigotas de concreto com vedação cerâmica, impermeabilizada com geomanta aplicada sob tinta impermeabilizante a base de óleo vegetal de mamona (*Ricinus communis*).

2.3.1 Medições Automáticas e Termopares do Tipo T. Cada protótipo dispõe de termopares tipo T (cobre-constantin) para leitura das temperaturas superficiais e das temperaturas interna do ar. As tradicionais medições de temperaturas de globo foram substituídas pelas leituras das temperaturas superficiais, consideradas, mais apropriadas ao estudo realizado que, por sua vez, não pretende comparar os dados obtidos com outros experimentos de outras localidades. Foram dispostos termopares nas superfícies interiores, três por cada elemento construtivo, tomando-se a média delas para representar os valores das temperaturas superficiais. Outro termopar foi instalado, aproximadamente, a 1 metro de altura, para a realização de medições das temperaturas internas do ar na zona habitada. Existem também termopares colocados a 0.10m e a 2.10m para verificação dos gradientes internos de temperatura do ar, que seguem outras normativas e finalidades que não foram consideradas no presente estudo. Portanto, os valores para a temperatura interna do ar, de cada protótipo, se referem apenas às leituras obtidas a 1 metro de altura em relação ao piso.

3 RESULTADOS OBTIDOS.

3.1 Comportamento e Desempenho Térmico da CVL. O dia 9 de outubro de 2004 foi tomado como dia de referência para o estudo do comportamento e desempenho térmico da cobertura verde leve (CVL) devido a sua característica de notável calor, superando o valor de 24.7°C, que corresponde a média das máximas obtida das Normais Climatológicas para São

Carlos de 1961 a 1990, publicadas pelo Ministério da Agricultura. O valor registrado no episódio do experimento apenas ficou abaixo da temperatura máxima absoluta registrada em 12 de outubro de 1963 com valor de 36.4°C , o que, contra os 34.04°C , temperatura máxima do episódio climático adotado, significa uma diferença de aproximadamente 2.5°C . Portanto, 9 de outubro pode ser considerado notável pelo seu valor. A amplitude térmica registrada nesse dia foi 21.7°C , com uma temperatura mínima de 12.7°C e uma máxima de 34.04°C . O dia foi de céu limpo, com valores da radiação solar global atingindo os 900 W/m^2 .

3.2 Dia Típico Experimental. A seguir, na figura 24, está o gráfico contendo os valores da temperatura externa do ar para o dia 9 de outubro de 2004, registrados em estação meteorológica automática Campbell Scientific Inc., composta por um registrador (*datalogger*) CR10X, com sistema de armazenamento de energia solar, por meio de células fotovoltaicas, ampliado por um multiplicador de 32 canais AM 416, por onde são registrados os dados referentes ao clima exterior. O dia 9 de outubro foi escolhido como referência por sua característica de notável calor ($t_{\text{máx}} = 34.04^{\circ}\text{C}$), superando o valor das temperaturas médias máximas peculiares ao mês de outubro que é de 24.7°C . Apenas ficou abaixo da temperatura máxima absoluta registrada para o referido mês eu é de 34.6°C , ocorrida em 12 de outubro de 1963, conforme já apontado anteriormente.

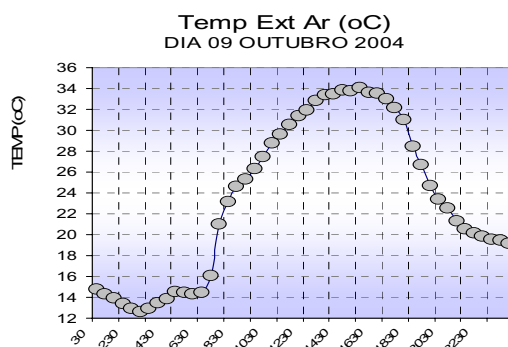


Fig. 4 – Dia Típico Experimental: 9 de outubro de 2004, representativo do episódio de notável calor e tomado como referência para o estudo do comportamento e do desempenho térmico do sistema de cobertura verde (CVL), construída no Campus da USP, região central da cidade de São Carlos (SP).

3.2 Comportamento Térmico. O comportamento térmico de um ambiente com aplicação de cobertura verde (CVL) pode ser observado por meio do gráfico, a seguir, na figura 25, onde se nota que quando a temperatura externa máxima vale cerca de 34°C , valor máximo ocorrido no período da tarde (registrado às 14 horas e 30 minutos, do dia 9 de outubro de 2004, Estação Meteorológica do Laboratório de Construção Civil, Departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC USP), sob o domínio de massa Tropical, de característica quente e seca (de atuação habitual na região de São Carlos na transição primavera-verão). O valor da temperatura interna (no mesmo horário, ressalte-se às 14h30) do ambiente CVL registrou 26°C para a temperatura interna do ar (diferença de 8°C em relação aos 34°C da externa). Foi registrado um valor de 24°C para a temperatura superficial da laje forro que suporta a CVL. Uma diferença de 10°C em relação ao valor da temperatura externa do ar. Ressalte-se que essas diferenças ocorrem no mesmo horário às 14 horas e 30 minutos do período vespertino. Além disso, fazem referência aos valores máximos que ocorreram, nesse dia, que é superior a temperatura média das máximas, que vale 24.7°C e pouco inferior à temperatura máxima absoluta, registrada até hoje, que foi de 36.4°C , ocorrida no dia 12 de outubro de 1963. O processo de trocas térmicas é retardado pela ação isolante da cobertura verde leve (CVL), devido a sua constituição termofísica, massa e resistência térmica, ação de sombreamento provocado pelos arbustos da grama, entre outros efeitos térmicos benéficos característicos desse tipo de sistema de cobertura.

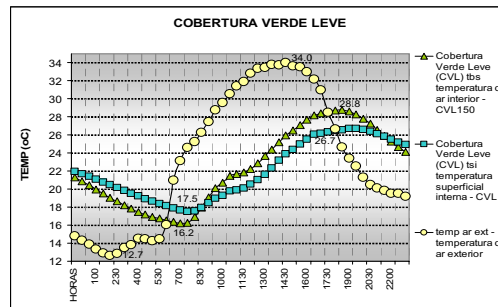


Fig. 5 - Gráfico do dia 9 de outubro contendo os valores da temperatura interna do ar (tbs CVL150) com altura tomada a 1.0 m do piso; da temperatura superficial do forro pré-moldado de laje cerâmica (tsicer) e da temperatura externa do ar (temp ar exterior).

O gráfico anterior evidencia que existe um atraso térmico (tempo que o calor externo demora a penetrar no ambiente interno) de aproximadamente 4 horas, acompanhado de um amortecimento térmico (manutenção da temperatura interna inferior aos valores da temperatura externa do ar) de cerca de 8°C . A amplitude térmica dos valores da temperatura interna do ar é da ordem de 12.5°C , enquanto que a amplitude térmica dos valores da temperatura superficial do sistema de cobertura verde (CVL) é de 10°C . Isso significa que a superfície interna da cobertura verde está absorvendo calor no momento de pico dessa absorção, portanto, tende a contribuir para minimizar os valores da temperatura interna do ar. No ápice das temperaturas do ar se verifica que a diferença entre a temperatura do ar exterior e a temperatura interna é de 5.3°C . No entanto, a temperatura máxima do ar exterior ocorre às 14 horas e 30 minutos, enquanto que a máxima do ar interior ocorre às 18 horas, ou seja, com um atraso térmico de 3 horas e 30 minutos.

3.3 Desempenho Térmico. O estudo de desempenho térmico consistiu em analisar as distintas temperaturas de uma CVL, em diferentes pontos, e compará-los com as temperaturas de outros três tipos de coberturas existentes no mercado: 1.) aço galvanizado; 2.) fibrocimento ondulado; 3.) laje pré-moldada cerâmica inclinada (sem telhas) e com impermeabilização (cor branca) de resina de óleo vegetal (*Ricinus communis*); 4.) cobertura verde leve e, finalmente; 5.) telha cerâmica.

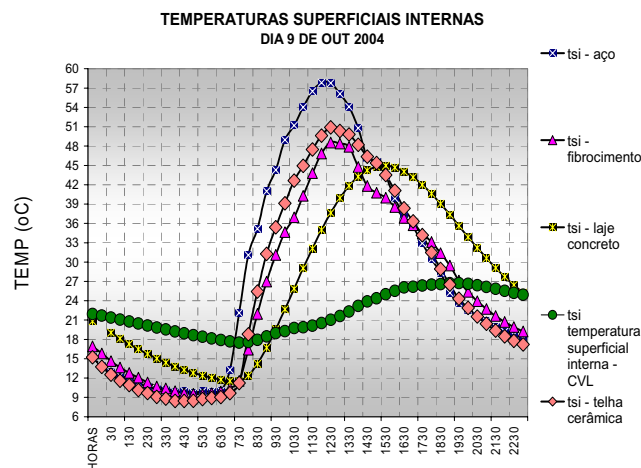


Fig. 6 - No gráfico, acima, estão dispostas as temperaturas superficiais internas de cinco protótipos: 1.) aço galvanizado; 2.) fibrocimento ondulado; 3.) laje pré-moldada cerâmica inclinada (sem telhas) e com impermeabilização, de cor branca, com resina de óleo vegetal (*Ricinus communis*); 4.) cobertura verde leve e, finalmente; 5.) telha cerâmica.

Dois aspectos principais se notam no gráfico das temperaturas superficiais dispostas na figura anterior, com relação ao desempenho térmico da CVL. Em primeiro lugar, que o atraso térmico observado entre a CVL e os sistemas tradicionais de cobertura no Brasil (cerâmica,

fibrocimento e aço galvanizado) é superior a sete horas. Isto significa que o calor começa a penetrar na CVL no período noturno (quando as temperaturas exteriores tendem a ser menores que as interiores), por volta da 20 horas (8:00 p. m.).

O segundo aspecto se refere ao amortecimento térmico registrado (os valores horários da temperatura superficial interna da CVL) é superior aos 20^oC, quando comparado com os demais sistemas de cobertura. A amplitude de variação térmica da CVL (menor temperatura em relação a maior que ocorre no interior do protótipo de CVL) é de $A = 6^{\circ}\text{C}$, tendo sido registradas neste dia de notável calor: temperatura mínima (na madrugada) igual a $t_{\text{mín}} = 18^{\circ}\text{C}$ e temperatura máxima igual a $t_{\text{máx}} = 27^{\circ}\text{C}$ (no início da noite por volta de 20 horas e 30 minutos). Portanto, quando comparada com os demais sistemas de cobertura a CVL se apresenta como a de melhor desempenho térmico, uma vez que apresenta a menor amplitude térmica ($A = 6^{\circ}\text{C}$). Além disso, as temperaturas superficiais contribuem no comportamento térmico fornecendo energia no período noturno (pois permanece com valores superiores aos registrados para a temperatura interna do ar) e, por outro lado, absorvendo calor no período da tarde, quando então se mantém com temperaturas inferiores às do ar interior.

4 DISCUSSÃO.

Os principais aspectos decorrentes da avaliação experimental de um sistema de cobertura verde leve se referem, neste artigo, a dois fatores principais. Primeiro, se após a verificação empírica a cobertura se mostra realmente leve, podendo ser aplicada em larga escala. Os ensaios de carga realizados mostram que o peso próprio de uma CVL pode variar de 96,4kg/m², com o substrato seco (sem água) até cerca de 285,4kg/m² com o saturado encharcado de água, isto é, com o substrato umedecido à exaustão até atingir o seu ponto de saturação. Isto permite concluir que a carga máxima exercida por metro quadrado de uma CVL (ressalte-se com água até a saturação) é equivalente a carga exercida pelo conjunto de uma cobertura de telhas cerâmicas, considerados a estrutura de madeira e o peso próprio das telhas. Dessa forma, é possível dizer que o sistema de coberturas CVL em relação ao peso próprio se apresentou adequado a sua ampla utilização em edifícios. O segundo aspecto se refere à questão do comportamento e do desempenho térmico desse referido tipo de cobertura. Quanto ao aspecto térmico cabe verificar a amplitude térmica do sistema de cobertura verde leve (CVL) e compará-lo aos demais tipos que foram elencados para a verificação e comparação entre todos eles. Assim sendo o quadro geral das amplitudes térmicas registradas está expresso na tabela, a seguir.

Tabela 1 – Comparação das amplitudes térmicas (A) e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais internas (tsi) dos distintos sistemas de cobertura analisados ao longo do período de ensaio, 4 a 10 de outubro de 2004.

	tsi (°C) telha cerâmica	tsi (°C) aço galvanizado	tsi (°C) fibrocimento ondulada 6mm	tsi (°C) laje concreto	tsi (°C) cobertura verde leve CVL	temp ar ext (°C)
MÁXIMA	50.9	57.8	48.6	45.0	26.7	34.0
MÉDIA	32.9	35.9	25.6	31.8	22.1	27.1
MÍNIMA	8.5	9.5	9.5	11.5	17.5	12.7
A (amplitude térmica)	42.5	48.4	39.1	33.4	9.2	21.4

A tabela anterior, das temperaturas superficiais interiores registradas, em cada protótipo, evidencia que a menor amplitude térmica que ocorreu pertence à CVL e vale 9.2^oC. De onde se conclui que é o sistema de cobertura que apresenta a maior dificuldade em trocar calor com o ambiente exterior. Ao contrário, o sistema composto por telhas de aço galvanizado (sem isolamento) apresenta a maior amplitude térmica ($A = 48.4^{\circ}\text{C}$), implicando em maior e mais

rápido processo de trocas térmicas. Deve-se ressaltar que o efeito das temperaturas superficiais não apenas interferem no aumento da temperatura interna do ar, mas, igualmente, provoca desconforto (trocas térmicas por radiação que independem do meio físico) dependendo da relação entre a proporção das superfícies radiantes e as superfícies de indivíduos expostos, denominado fator de forma.

Saliente-se ainda que, em média, as temperaturas da pele normalmente se encontram na faixa dos 31 a 34^oC, o que significa que a partir desses valores o organismo humano passa a ganhar calor por radiação. Logo, as superfícies de sistemas de cobertura que apresentam valores superiores a essa faixa de temperatura estarão emitindo energia radiante a todos os ocupantes de recintos interiores. Pelo gráfico das temperaturas superficiais interiores, figura 26, um sistema de cobertura de aço galvanizado passa a fornecer calor a partir das 8 até 18 horas, quando então atinge e mantém os valores de suas temperaturas superiores aos 33^oC, em dia de céu limpo, com incidência de radiação solar global na faixa de 900 a 1000 W/m². O dia 9 de outubro se manteve com o céu limpo, conforme pode ser observado pelo gráfico da radiação solar global, que apresentou uma parábola característica dos dias em que ocorre reduzida nebulosidade. Por sua vez, um sistema de cobertura de telhas onduladas de fibrocimento de 6 mm ultrapassa os 33^oC das 10 às 18 horas e 30 minutos, em condições iguais ao do exemplo anterior de aço galvanizado. A cobertura de telha cerâmica atinge os 33^oC às 9 horas e trinta minutos, permanecendo assim até às 18 horas e 30 minutos. Logo, apresenta comportamento semelhante aos das telhas de fibrocimento do exemplo anterior.

Uma cobertura, tradicional no Brasil, de laje pré-moldada cerâmica composta por vigotas de concreto e lajotas cerâmicas de 150 mm, com aplicação de uma camada de concreto de aproximadamente 250 mm, impermeabilizada com resina vegetal na cor branca, portanto, sem a utilização de qualquer tipo de telha, atinge os 33^oC das 12 horas às 20 horas e 30 minutos em função de constituição termo-física, a exemplo de sua massa térmica e absorvância. Ao contrário dos demais sistemas de cobertura, a CVL não atinge os 33^oC, nas mesmas condições de todos os demais, uma vez que a sua temperatura superficial interna máxima verificada experimentalmente foi de 26.7^oC, ficando inclusive abaixo da temperatura máxima do ar registrada que foi de 28.8^oC. Fato que significa que as superfícies interiores das CVLs contribuem para a absorção do calor interno, no período crítico que ocorre na parte da tarde.

Tabela 2 - Comparação das amplitudes térmicas (A) e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas internas do ar (tbs) dos distintos sistemas de cobertura analisados ao longo do período de ensaio, 4 a 10 de outubro de 2004.

	tbs (°C) cerâmica	tbs (°C) aço	tbs (°C) fibro	tbs (°C) laje concr.	tbs (°C) CVL	temp ar ext (°C)
MAX	30.4	45.0	31.0	34.7	28.8	34.0
MED	24.1	26.5	24.5	27.1	22.4	27.2
MIN	15.2	11.5	14.4	14.8	16.2	12.7
A (amplitude térmica)	15.2	33.4	16.5	19.9	12.6	21.4

As temperaturas internas do ar também expressam, juntamente, com as temperaturas superficiais na percepção do Conforto Térmico e, igualmente, permitem estimar o comportamento e o desempenho térmico de ambientes interiores. Pela tabela anterior, das temperaturas internas do ar (tbs) pode ser verificado que o desempenho mais adequado também cabe ao sistema CVL, que apresentou valores da ordem de 28.9^oC para a sua máxima temperatura. Comparando-se esse valor com a temperatura externa máxima (34^oC), obtém-se uma diferença de 5^oC, valor absolutamente congruente com a possibilidade de se manter temperaturas interiores abaixo das exteriores, sem a aplicação de sistemas passivos ou mesmo de condicionadores de ar eletro-mecânicos. Cabe ainda frisar que o valor máximo encontrado para a temperatura do ar interior do sistema CVL ainda se manteve abaixo dos 29 a 32^oC,

porém não no momento de pico da temperatura externa (34⁰C às 14 horas e 30) e sim às 19 horas com um valor de 28.8⁰C. Isto é, com um atraso de aproximadamente 5 horas. No mesmo horário, a comparação se traduz da seguinte forma: temperatura externa igual 34⁰C contra 26⁰C da temperatura interna da CVL, ou seja, um amortecimento de 8⁰C. O que é bastante aceitável para o comportamento térmico, nesse dia experimental de excepcional calor, que se apresentou com valores acima da média das máximas, para esse episódio climático de transição primavera-verão, na região de São Carlos (SP).

5 AGRADECIMENTOS.

Os principais agradecimentos são para as parcerias com as empresas que forneceram materiais e produtos imprescindíveis à realização desta investigação: Campbell Scientific do Brasil, Maccaferri, Construquil, NC Floricultura.

Da mesma forma, merecem os agradecimentos os alunos de iniciação científica Marcos Pereira Lima (PIBIC CNPq), Aram Cunha (IC FAPESP) e Danilo Luz (PIBIC CNPq), todos do curso de graduação em Engenharia Civil, da EESC USP.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil Sergio Aparecido Trevellin e Paulo Pratavieira pela dedicação e ao apoio nos momentos cruciais da realização da pesquisa sobre CVLs.

À direção da EESC USP, Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr e Prof. Dr. José Jairo de Sales pelo apoio na concretização dos protótipos necessários à realização dos ensaios térmicos e, sobretudo, ao estímulo compartilhado para a continuidade dessa investigação.

Aos órgãos de financiamento à pesquisa, FAPESP e CNPq, que forneceram as bolsas de iniciação científica necessárias ao trabalho de investigação realizado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Secretaria Nacional de Irrigação, Departamento Nacional de Meteorologia (1992): *Normais Climatológicas 1961 -1990*. Brasília.

Monteiro, C. A de F. (1967): *A dinâmica climática e as chuvas do Estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de Atlas*. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia. 68 p.

Vecchia, F. (1997): *Clima e ambiente construído: a abordagem dinâmica aplicada ao Conforto Humano*. São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH USP), Universidade de São Paulo. (Tese de doutoramento).