



ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



EVENTO
ON-LINE

02 a 04
de dezembro 2020

Indicador de temperatura baseado em substâncias termocromáticas

Manoel José Bulhões Barauce
Engenharia da Produção - UTFPR
Prof. Drº. Evaldo Toniolo Kubaski
Engenharia de materiais - UEPG
Prof. Drº. Robson Couto da Silva
Engenharia de materiais - UEPG
Prof. Drº. Sergio Mazurek Tebcherani
Engenharia da Produção - UTFPR

Resumo: Foi desenvolvida uma ideia inovadora usando propriedades de substâncias termocromáticas para fabricar um dispositivo indicador de temperatura. O aparelho é uma placa que registra a temperatura máxima alcançada em diversos dispositivos do setor industrial e doméstico. A temperatura é registrada definitivamente na placa combinando cores diferentes que são comparadas a uma tabela de referência e assim é indicada a temperatura máxima.

Palavras-chave: dispositivo, indicador temperatura, termocromáticas.

Temperature detector based on thermochromic substances

Abstract: An innovative idea using thermochromic properties of substances was developed to manufacture a temperature indicator device. The device is a plaque that registers the maximum temperature achieved in several devices in industrial and domestic fields. The temperature is registered definitely in the plaque combining different colors that are compared to a reference table and thus the maximum temperature is indicated.

Keywords: thermochromic; temperature indicator, device.

1. Introdução

Alguns compostos e substâncias possuem a característica de mudar de cor devido à variação da temperatura e essa propriedade óptica é denominada termocromismo, que pode ser verificada tanto em compostos orgânicos (Day, 1963) quanto inorgânicos (Day, 1968). Além disso, a mudança de cor do composto pode ser reversível ou irreversível, e

a opção por um composto reversível ou irreversível depende da aplicação para a qual foi projetado.

Os mecanismos responsáveis pelo termocromismo em compostos orgânicos e inorgânicos são bastante diferentes. Em compostos orgânicos, por exemplo, o termocromismo pode ser devido a um equilíbrio entre duas espécies moleculares ou a um simples alargamento de uma curva de absorção próxima ao ultravioleta (Day, 1963). Por outro lado, mudanças na estrutura cristalina ou na geometria das ligações são frequentemente responsáveis pelo termocromismo em compostos inorgânicos (Day, 1968).

Um bom exemplo de aplicação prática de compostos orgânicos com efeito termocrômico é na indústria de alimentos, onde uma composição termocrômica irreversível pode ser usada para indicar se uma embalagem de alimento foi mantida em temperaturas inadequadas. Por exemplo, a cor da composição termocrômica não sofre alteração se a embalagem do alimento for mantida na geladeira (temperatura igual ou inferior a 5°C). Em contrapartida, a cor da composição muda se a embalagem for retirada do refrigerador indicando que o alimento contido na embalagem não é adequado para consumo humano. Um exemplo desse indicador de temperatura pode ser encontrado no pedido de patente de Lucht e Euler (2009).

Compostos termocrômicos também são utilizados para indicar as mudanças de temperatura em autoclaves. Nesse caso, existem indicadores de temperatura específicos baseados em compostos termocrômicos que são colocados no ciclo de esterilização; esses indicadores de temperatura sofrem mudança de cor e são a garantia de que a temperatura correta foi atingida durante o ciclo de esterilização.

Um exemplo de um composto inorgânico termocrômico é o óxido de vanádio (VO_2) que é usado para produzir janelas inteligentes. Essas janelas inteligentes são janelas de vidro com revestimentos especiais, como o VO_2 , com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica por resfriamento onde é utilizado um sistema de ar condicionado. Estas janelas inteligentes com revestimentos termocrômicas geralmente são projetadas para controlar a quantidade de calor e luz que passe através da janela em reação a uma fonte externa (Chen et al., 2011).

Em geral, os dispositivos termocrômicos realmente utilizados como indicadores de temperatura contêm material inorgânico com base em elementos tóxicos como cádmio, mercúrio e cromo. Além disso, esses dispositivos podem ser baseados em materiais orgânicos que limitam seu uso a baixas temperaturas, por exemplo, temperaturas próximas ao ponto de congelamento da água e abaixo da temperatura de ebulição da água. Além disso, na maioria dos casos, os compostos inorgânicos usados para fazer tais dispositivos limitam sua temperatura máxima de trabalho em cerca de 300°C. Além disso, a maioria dos materiais termocrômicos empregados são reversíveis e, conseqüentemente, esses dispositivos não podem ser usados para registrar o histórico térmico de amostras.

Além da mudança de cor de dispositivos, há várias outras formas de controle da temperatura, incluindo o sensor de sonda (termopares), e dispositivos que sofrem uma mudança de um parâmetro físico (por exemplo, uma mudança controlada de tamanho quando aquecido).

Os termopares são em grande parte empregados em processos industriais. No entanto, embora os termopares sejam mais precisos do que os dispositivos baseados em compostos termocromáticos, eles têm a desvantagem de precisar de uma conexão direta entre os ambientes interno (onde a temperatura é medida) e externo. Em diversas situações onde a medição da temperatura é necessária esta conexão entre os dois

ambientes é difícil ou impossível e também apresenta um alto custo. Termopares também apresentam dificuldade de utilização em sistema de produção em série, principalmente em sistemas de aquecimento demorados, como grandes fornos de sinterização. Além disso, não há garantia de que a temperatura correta foi medida corretamente no termopar. Na verdade, existe a necessidade de utilizar outro termopar para verificar a temperatura e, conseqüentemente, o processo de medição torna-se ainda mais caro.

Em um processo de fabricação contínuo, um dispositivo com base em compostos termocrômicos apresentam a possibilidade de ser submetidos ao mesmo ciclo térmico das peças que se encontram na linha de produção. Assim, o detector é capaz de registrar a mesma história térmica das peças. Da mesma forma, dispositivos que sofrem alteração em um parâmetro físico (expansão térmica controlada, por exemplo) quando aquecidos também podem ser submetidos ao mesmo ciclo térmico, podendo ser utilizados em equipamentos de produção em série. No entanto, esses dispositivos precisam de um tempo mínimo para registrar a mudança de temperatura, equipamentos especializados e pessoal qualificado para ler a mudança de temperatura. Além disso, uma expansão térmica controlada é dependente do material do dispositivo, e exemplos de materiais com essa característica para fabricar um indicador de temperatura são relativamente escassos e com alto custo.

Este artigo apresenta uma ideia inovadora para indicar mudanças de temperatura a partir de materiais termocrômicos. Esta ideia utiliza materiais termocrômicos de baixo custo, não tóxicos e não poluentes. O dispositivo desenvolvido é capaz de trabalhar em várias faixas de temperatura dependendo apenas de sua construção, incluindo temperaturas próximas da temperatura ambiente até temperaturas acima de 1000°C. Além do dispositivo em si, o artigo também descreve a abordagem usada para desenvolvê-lo.

2. Metodologia

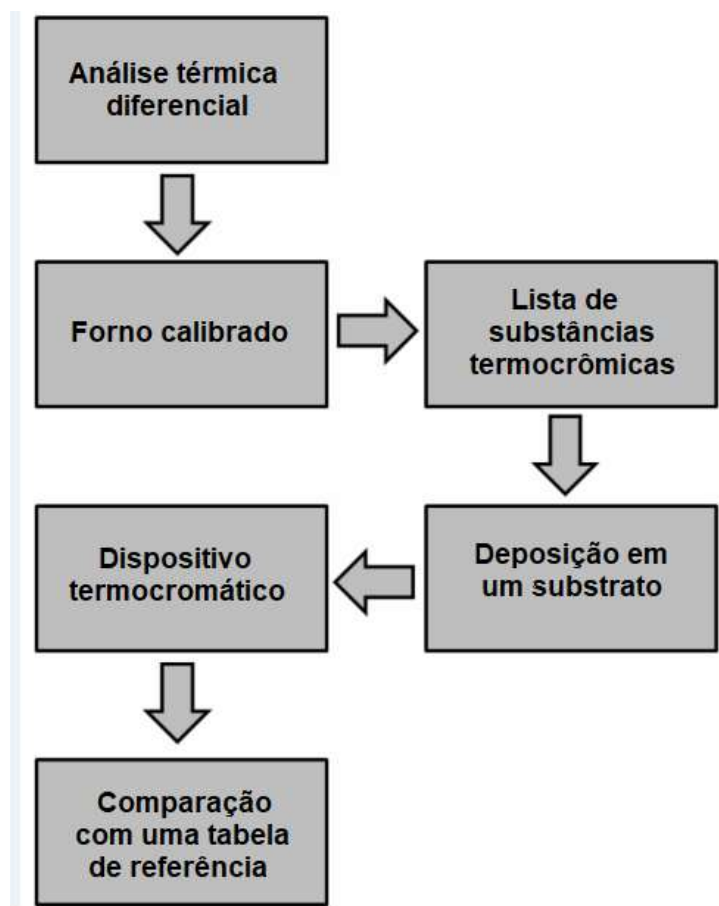
A ideia inovadora é a fabricação de um dispositivo para indicar mudanças de temperatura a partir de substâncias termocrômicas. Em primeiro lugar, a metodologia de fabricação desse dispositivo inovador consistia na escolha de várias substâncias simples ou compostas que mudam de cor durante o aquecimento. As substâncias termocrômicas a serem empregadas podem ser orgânicas ou inorgânicas.

A primeira etapa para determinação da substância termocrômica foi realizada por meio de um equipamento de análise térmica diferencial (DTA) (Netzsch STA 409 EP) para perceber eventos térmicos (picos ou inflexões na curva DTA) que podem estar associados a uma possível mudança de cor. A análise DTA foi conduzida em ar, usando uma taxa de aquecimento de 5°C/min. A análise DTA é capaz de detectar eventos térmicos em uma amostra que é aquecida de forma controlada, e esta análise fornece uma curva de DTA em função da temperatura. Posteriormente, os eventos térmicos detectados nas curvas DTA foram investigados em um forno calibrado para confirmar se as transições térmicas podem ser associadas a uma mudança de cor. Este passo consistiu de aquecimento de amostras de uma substância até temperaturas imediatamente abaixo e acima da transição térmica da temperatura medida na análise DTA; as amostras foram então resfriadas a ar e inspecionadas, observando com a intenção de verificar a real mudança de cor da substância. Além disso, os parâmetros CIELab da cor da substância foram medidos usando um espectrofotômetro Varian Cary 50.

Após o procedimento acima, cada substância que tem sua mudança de cor confirmada é incluída em uma tabela que, na verdade, consistia em uma lista de substâncias termocrômicas com suas respectivas mudanças de cor e as respectivas temperaturas de transição.

O uso do dispositivo e, conseqüentemente, sua faixa de temperatura específica quais substâncias termocrômicas serão escolhidas. Após a escolha das substâncias, estas são depositadas em um substrato, que pode ser cerâmico, metálico, polimérico, vítreo, ou materiais compostos. O substrato pode conter uma ou mais substâncias termocrômicas, mas geralmente contém mais de uma, a fim de cobrir uma ampla faixa de temperatura. Cada substância termocrômica tem sua própria temperatura de transição, e nessa temperatura específica ocorre a mudança de sua cor. O dispositivo termocrômico fabricado pode ser utilizado em qualquer processo de aquecimento e, após um ciclo térmico, o dispositivo é retirado do local de medição e depois comparado a uma mesa de referência. Esta comparação permite detectar a temperatura máxima alcançada durante um processo de aquecimento. O procedimento empregado para fabricar o dispositivo termocrômico inovador é esquematicamente representado na Figura. 1.

Figura 1 - Representação esquemática da ideia inovadora usada para fabricar o dispositivo termocrômico.



Fonte: Os autores (2020)

3. Resultados e discussão

A abordagem empregada permitiu o desenvolvimento de um indicador inovador de temperatura baseado em materiais termocrômicos que é protegido por um pedido de patente brasileira, número BRPI 1003228-2 (Tebcherani et al., 2010).

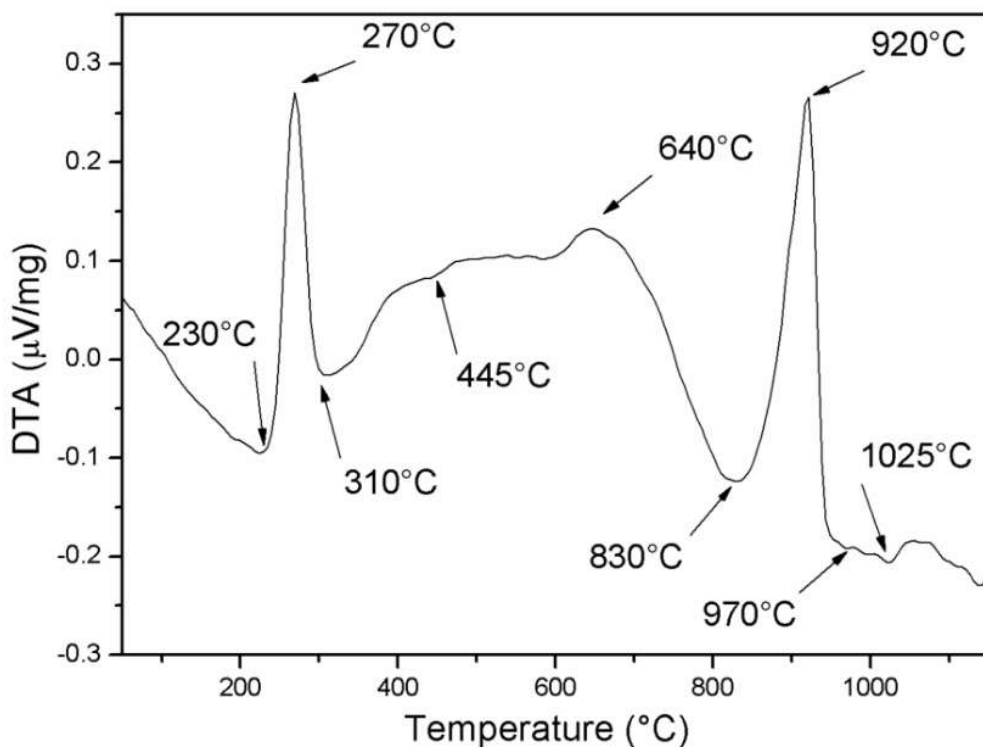
O indicador de temperatura desenvolvido utiliza materiais termocrômicos de baixo custo, atóxicos e não poluentes. Além disso, o dispositivo pode ser utilizado em várias gamas de temperaturas (perto da temperatura ambiente até temperaturas mais elevadas do que 1000°C) dependendo apenas da sua construção. Além disso, o dispositivo não possui fonte de energia externa ou interna, não há necessidade de usar equipamento ou

pessoal especializado para medir a mudança de temperatura e o dispositivo não requer manutenção para funcionar corretamente.

O indicador de temperatura é um dispositivo baseado na aplicação de uma ou mais substâncias termocrômicas sobre um substrato que pode ser cerâmico, polimérico, metálico, vítreo ou composto. Na verdade, o dispositivo consiste em uma placa ou barra onde as substâncias termocrômicas são depositadas. A escolha do substrato e da substância termocrômica a ser utilizada depende da faixa de temperatura e do ambiente de aplicação.

Um exemplo de uma substância termocrômica testada para ser empregada no dispositivo é o sulfato de manganês (II) misturado com cera de parafina. A Figura 2 mostra uma curva de DTA desta substância, e pode ser observado a ocorrência de eventos térmicos em 230, 270, 310, 445, 640, 830, 920, 970 e 1025°C.

Figura 2 - Curva DTA de sulfato de manganês (II) em mistura com cera de parafina.



Fonte: Os autores (2020)

Estes eventos térmicos são indicados por setas e as suas respectivas temperaturas na figura 2; essas temperaturas representam uma mudança na cor da substância, conforme indicado na Tabela 1. A taxa de aquecimento empregada para coletar os dados DTA permitiu uma precisão de $\pm 5^\circ\text{C}$ em cada medição de temperatura de transição, e medidas de melhor precisão são possíveis se taxas de aquecimento menores forem empregadas.

Na Tabela 1 é demonstrada a faixa de temperatura de cada cor apresentada pela substância termocrômica utilizada como exemplo (sulfato de manganês misturado com cera de parafina neste caso).

Tabela 1 – Exemplo de substância termocrômica	
	Parâmetros CIELab

Faixa de temperatura (°C)	Cor da web	L*	a*	b*
Abaixo de 225	Branco fantasma	98	0	0
230 a 265	Marfim	100	-1	4
270 a 305	Pêssego	87	3	17
310 a 440	Rosa-castanho	67	8	13
445 a 635	Prata	76	5	8
640 a 825	Madeira robusta	82	6	27
830 a 915	Rosa-castanho	63	11	16
920 a 965	Bronzeado	73	6	11
970 a 1020	Prata	77	4	9
Acima de 1025	Bronzeado	73	9	15

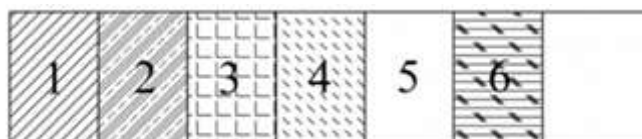
Fonte: Os autores (2020)

Os nomes das cores estão de acordo com a nomenclatura de cores da internet. Além dos nomes das cores, a Tabela 1 mostra os parâmetros CIE Lab das cores das substâncias. O sistema CIE Lab inclui três parâmetros para identificar uma cor (Shevell, 1979), L^* , a^* e b^* . O parâmetro L^* indica o nível de luminosidade, que varia de 0 (preto) a 100 (branco); o parâmetro a^* : $a^* < 0$ indica a quantidade de verde enquanto $a^* > 0$ indica a quantidade de vermelho; o parâmetro b^* : $b^* < 0$ indica a quantidade de azul enquanto $b^* > 0$ indica a quantidade de amarelo. Os parâmetros a^* e b^* são as coordenadas cromáticas (Dondi et al., 2008; Dondi et al., 2007). Após análise criteriosa da Tabela 1, pode-se observar que a substância apresenta nove transições de cores em função da temperatura, na faixa de temperatura avaliada.

O termocrômico pode ser posicionado no interior ou em contato com o local onde é necessária a medição da temperatura, sem necessidade de conexão direta com o entorno externo. Após o ciclo térmico, o dispositivo é retirado do local de medição e depois comparado a uma mesa de referência.

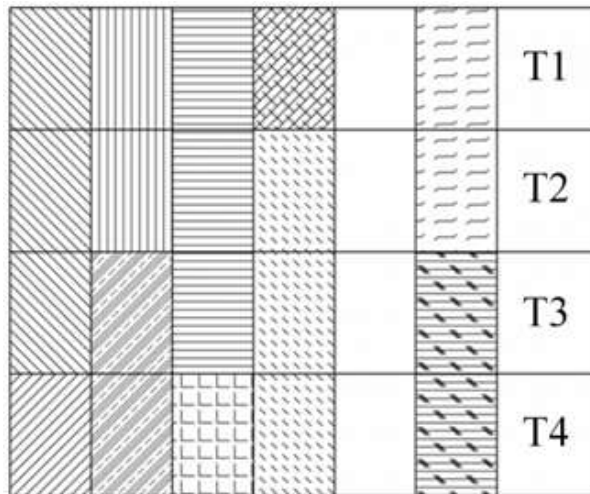
A operação do dispositivo pode ser descrita como segue. Antes do ciclo térmico, o dispositivo termocrômico apresenta uma cor específica dependendo das substâncias termocrômicas empregadas. Após o ciclo térmico as substâncias termocrômicas podem ter suas cores alteradas, dependendo das temperaturas atingidas durante o ciclo térmico. Além disso, uma vez que a temperatura de transição da substância é atingida a mudança em sua cor ocorre em poucos segundos. O resultado é interpretado comparando a cor obtida após o aquecimento do dispositivo a uma tabela de referência. Esta tabela contém a mudança de cor em função da temperatura dos materiais termocrômicos que foram empregados na fabricação do dispositivo. A Figura 3 apresenta uma representação esquemática do dispositivo termocrômico. A figura 4 a sua tabela de referência.

Figura 3 - Representação esquemática do dispositivo termocrômico.



Fonte: Os autores (2020)

Figura 4 - Representação esquemática da tabela de referência. As hachuras indicam a cor de cada substância termocrômica.



Fonte: Os autores (2020)

A figura 3 mostra uma representação esquemática do dispositivo termocrômico descrito no presente artigo. Como já mencionado, o dispositivo consiste em um substrato onde as substâncias termocrômicas são depositadas. Os números da figura 3 representam as substâncias termocrômicas que são depositadas no substrato do dispositivo. Por outro lado, a figura 4 é uma representação esquemática da tabela de referência que expressa a mudança de cor de cada substância termocrômica e sua respectiva temperatura de transição. Na figura 5 é mostrada a referência da cor alcançada pelo termocrômico após ser submetido a um ciclo térmico. Os códigos T1, T2, T3 e T4 indicam faixas de temperatura distintas para comparação com os dispositivos termocrômicos.

Figura 5 -

Figura 3

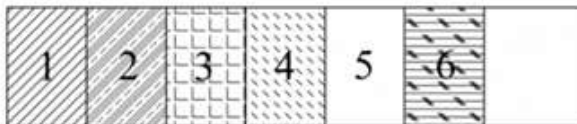
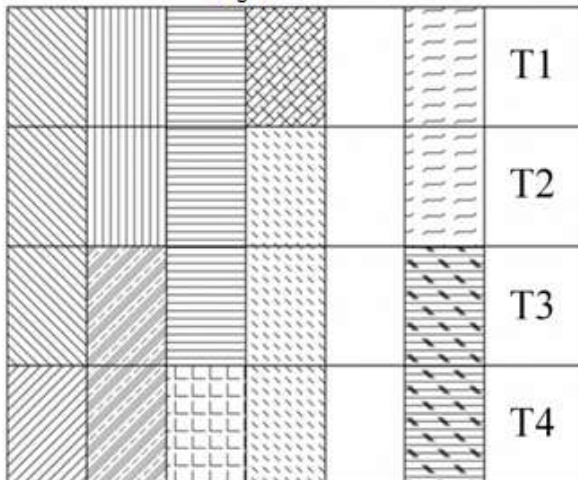


Figura 4



Fonte: Os autores (2020)

O funcionamento do dispositivo termocrômico pode ser melhor compreendido analisando o exemplo a seguir. O dispositivo termocrômico pode ser colocado no lado de uma mufla ou fornalha, e depois aquecendo os presentes dispositivos a cor esquematicamente representadas na figura 3. Esta cor é comparada com a tabela de referência que é mostrada esquematicamente na figura 4. Essa comparação indica que a mufla atingiu, durante o aquecimento, a temperatura máxima do ciclo térmico T4 da tabela de referência.

O dispositivo termocrômico é muito versátil devido ao seu processo de fabricação que permite cobrir uma ampla faixa de temperatura (perto da temperatura ambiente para cima 1000°C), e devido ao seu baixo custo. Conseqüentemente, o dispositivo pode ser empregado em um grande número de processos que envolvem aquecimento, incluindo fins domésticos e industriais. Na verdade, as operações de aquecimento são encontradas em mais de 50% do processo industrial. O dispositivo pode ser usado como um indicador de temperatura em vários campos industriais que incluem alimentos, metalurgia, siderurgia, farmacêutica e petroquímica. Além disso, o dispositivo é útil para controlar a temperatura em crematórios, incineradores de resíduos e autoclaves.

Os fornos e muflas de laboratório usam um sistema de termopar microprocessado que pode frequentemente ser contaminado ou oxidado durante a operação. Esses efeitos resultam em medições erradas de temperatura e, conseqüentemente, o dispositivo desenvolvido é uma alternativa como indicador de temperatura para garantir o desempenho eficiente de termopares de fornos e muflas. A mesma ideia pode ser considerada também para incineradores de resíduos, fornos para produção de vidro temperado, fornos de tratamento térmico, entre várias outras aplicações.

Além de ser muito útil como um indicador de temperatura que permite o controle da temperatura, o dispositivo também pode ser empregado como garantia de qualidade, pois tem a possibilidade de garantir que a temperatura correta foi atingida durante o processo de aquecimento. Além disso, quando são utilizadas substâncias termocrômicas irreversíveis, o dispositivo pode ser armazenado como certificado de garantia. Por exemplo, o dispositivo pode ser utilizado em autoclaves juntamente com os itens a serem esterilizados, e guardado como prova de que a temperatura necessária para o processo de esterilização foi atingida. Da mesma forma, o dispositivo pode ser colocado em fornos de tratamento térmico para que seja medida a temperatura real de tratamento das partes metálicas. A utilização do dispositivo como certificado de garantia pode até ser útil como prova em eventuais ações judiciais.

4. Conclusão

A abordagem empregada permitiu o desenvolvimento de um indicador inovador de temperatura baseado em materiais termocrômicos, protegido por pedido de patente brasileira. Este dispositivo tem as vantagens de ser atóxico e não poluente. Além disso, não requer nenhuma fonte de energia externa, nenhum equipamento especializado e pessoal para funcionar corretamente.

O inovador dispositivo termocrômico pode ser usado em diversos campos domésticos e industriais, e é uma ferramenta útil para ser usada como garantia de qualidade para garantir que a temperatura correta foi atingida durante o processo de aquecimento.

Referências

Chen, Z., Gao, Y., Kang, L., Du, J., Zhang, Z., Luo, H., Miao, H., Tan, G., VO₂-based double-layered films for smart windows: Optical design, all-solution preparation and improved properties. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. doi:10.1016/j.solmat.2011.05.041. 2011.

Day, J.H. Thermochromism. **Chemical Reviews**. 63, 65-80, 1963
<https://doi.org/10.1021/cr60221a005>

Day, J.H. Thermochromism of inorganic compounds. **Chemical Reviews**. 68, 649-657, 1968. <https://doi.org/10.1021/cr60256a001>

Dondi, M., Matteucci, F., Baldi, G., Barzanti, A., Cruciani, G., Zama, I., Bianchi, C.L.. Gray-blue $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MoO}_x$ ceramic pigments: Crystal structure, colouring mechanism and performance. **Dyes Pigment**. 76, 179-186, 2008.

Dondi, M., Matteucci, F., Zama, I., Cruciani, G., High-performance yellow ceramic pigments $\text{Zr}(\text{Ti}_{1-x-y}\text{Sn}_{x-y}\text{V}_y\text{M}_y)\text{O}_4$ (M=Al, In, Y): Crystal structure, colouring mechanism and technological properties. **Materials. Research. Bulletin**. 42, 64-76, 2007.

Lucht, B.L., Euler, W.B. Low Temperature Irreversible Thermochromic Compositions. 2009/0278090

Shevell, S. **The Science of Color**, second ed. Elsevier, Oxford, 1979.

Tebcherani, S.M., Bento, A.C., Sequinel, T., Kubaski, E.T., Kovaleski, J.L., Pilatti, L.A. Dispositivo indicador de temperatura à base de materiais termocrômicos. BRP11003228-2, 2010.