

# Phase-stepped deflectometry as a powerful tool to determine the appearance of paints and coatings

# Deflessione a fasi come strumento per determinare le proprietà estetiche di pitture e rivestimenti

Martin Bosma, Enrico Rensen – ALLNEX CIG

## INTRODUCTION

In many fields where coatings are used it is essential that their appearance is very good. Freshly applied paints typically have an uneven surface due to the application process. In order to obtain a sufficiently smooth final surface profile, it is essential that the paint has sufficient ability to level out this initial surface roughness without running into sagging problems on non-horizontal surfaces.

In studies aiming at improving appearance it is essential that the experimentalist does not have to rely on visual assessment of coating appearance. The method described in this article is based on a relatively new optical technique called phase-stepped deflectometry<sup>[1-3]</sup> and offers a quantitative and objective determination of the surface profile of paints and coatings.

One of the advantages of phase-stepped deflectometry (PSD) is that it only requires very cheap hardware. Being an optical, contactless and fast technique offers the additional advantage that it can even be used to study the development of appearance in drying liquid paints.

## PHASE-STEPPED DEFLECTOMETRY

With PSD several so-called phase-stepped sinusoidal patterns are displayed on a computer screen which illuminates the surface under study and a camera is used to capture images of the reflected patterns. With our PSD setup we use four horizontal patterns and four vertical patterns.

Figure 1 shows an example of the captured images of the four horizontal patterns reflected by a freshly-applied, uneven paint surface.

## INTRODUZIONE

*In molte aree in cui vengono utilizzati i rivestimenti, un requisito essenziale è che le loro qualità estetiche siano molto soddisfacenti. Le pitture appena applicate presentano tipicamente una superficie irregolare dovuto al processo di applicazione. Per ottenere un profilo superficiale finale sufficientemente levigato, è importante che la pittura possa livellare le rugosità superficiali iniziali senza correre il rischio di colature su superfici non orizzontali. Negli studi che mirano a migliorare le caratteristiche estetiche è altresì importante che chi compie la ricerca non si debba affidare soltanto ad una valutazione puramente visiva dell'aspetto del rivestimento. Il metodo descritto in questo articolo si basa su una tecnica di analisi ottica relativamente nuova, denominata deflessione a fasi<sup>[1-3]</sup> che consente una determinazione quantitativa e oggettiva del profilo superficiale di pitture e rivestimenti. Uno dei vantaggi offerti dalla deflessione a fasi (PSD) è che richiede un'attrezzatura hardware molto economica. Trattandosi di una tecnica veloce, visiva senza contatto, offre il vantaggio ulteriore di poter essere adottata anche per studiare lo sviluppo delle proprietà estetiche delle pitture liquide in essiccazione.*

## DEFLESSIONE A FASI

*Con PSD diversi modelli cosiddetti sinusoidali a fasi vengono presentati sullo schermo di un computer che illumina la superficie analizzata utilizzando anche una fotocamera per catturare le immagini dei modelli riflessi. Con l'impostazione delle PSD vengono impiegati quattro modelli orizzontali e quattro verticali. In Figura 1 è mostrato un esempio delle immagini catturate dei quattro modelli orizzontali riflessi dalla superficie di una*

The distortion of these sinusoidal patterns upon reflection by the uneven paint surface is clearly visible.

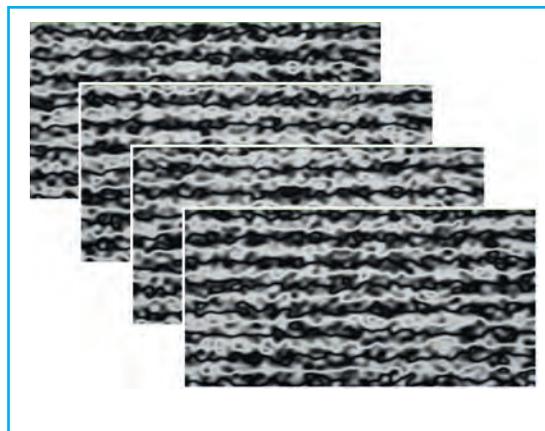
Analysis of the captured images allows the quantitative determination of the local slope in two perpendicular directions at each position on the surface. An example of the surface slope profile for a freshly-sprayed paint is shown in Figure 2. These slope values were calculated from the captured images shown in Figure 1.

### PSD TO DETERMINE THE APPEARANCE OF COATINGS

Some illustrative examples of surface profiles of coatings measured with PSD are shown in Figure 3. Figure 3a shows the surface profile of a coating where the appearance is clearly hampered by short wave roughness. Figure 3b shows the appearance of a coating which shows excessive sagging which is evident from the sagging tears and dripping nose formation.

Figure 3c gives the surface profile of a coating with craters whereas Figure 3d is an example of a coating subjected to a condensation test during which blisters were formed. Figure 3e shows coatings applied on so-called sagging panels. Such panels have several holes and the paint is applied with increasing layer thickness from left to right in Figure 3e. The length of the sagging tears that form besides the holes is used as a measure of the degree of sagging.

The examples of Figure 3e show an unmodified clear coat (left) and a comparable clear coat modified with a Sag Control Agent<sup>[4]</sup> (SCA, right). The parts of the sagging panel shown here were chosen such that both coatings have comparable lengths of the sagging tears around the holes. As expected, the dry film thickness (DFT) is significantly higher for the CC with SCA at positions of equal tear length. What is very striking



**Fig. 1** Example of captured PSD images from horizontal patterns displayed by the monitor and reflected by an uneven paint surface  
*Esempio di immagini PSD bloccate da modelli orizzontali, mostrati sul monitor e riflessi da una superficie irregolare della pittura*

*pittura irregolare appena applicata. Si osserva chiaramente la distorsione di questi modelli sinusoidali riflessi dalla superficie irregolare della pittura.*

*L'analisi delle immagini catturate ha consentito di determinare quantitativamente la curva locale nelle due direzioni perpendicolari in ogni posizione sulla superficie. Un esempio del profilo della curva superficiale relativa ad una pittura appena applicata a spruzzo è presentato in Figura 2. Questi valori della curva sono stati calcolati in base alle immagini catturate, illustrate in Figura 1.*

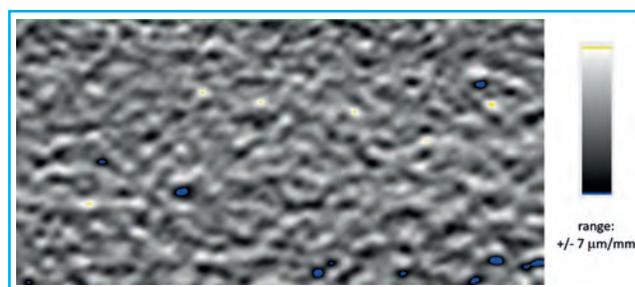
### PSD PER DETERMINARE LE PROPRIETÀ ESTETICHE DEI RIVESTIMENTI

*Alcune immagini esemplificative dei profili superficiali, misurati con PSD sono mostrate in Figura 3.*

*In Figura 3a è rappresentato il profilo superficiale di un rivestimento il cui aspetto è chiaramente caratterizzato da una rugosità a ondulazione corta. Per contro, Figura 3b mostra le qualità estetiche di un rivestimento che presenta una rilevante colatura, resa visibile dalla formazione di sgocciolature lineari e da un punto di fuoriuscita delle gocce. La Figura 3c mostra il profilo superficiale di un rivestimento in cui sono presenti crateri, e la Figura 3d fornisce un esempio di un rivestimento sottoposto al test della condensazione durante il quale si formano bollicine. Infine in Figura 3e sono illustrati i rivestimenti applicati sui cosiddetti*

*pannelli di colatura, che presentano diversi fori e su cui la pittura viene applicata con uno spessore dello strato crescente, da sinistra a destra. La lunghezza delle linee di colatura che si formano in prossimità dei fori è stata analizzata come misura del grado di colatura.*

*Gli esempi di Figura 3e mostrano una vernice trasparente non modificata (a sinistra) ed una vernice trasparente equivalente, modificata con un Agente di Controllo della Colatura<sup>[4]</sup> (SCA, a destra). Le parti del pannello di colatura presentate in questo articolo sono state scelte in modo che entrambi i rivestimenti avessero lunghezze comparabili*



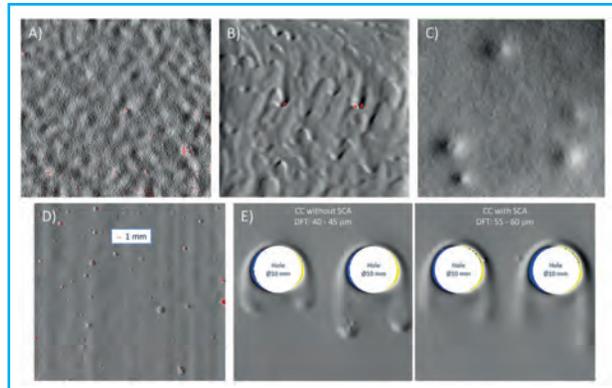
**Fig. 2** Local slope values in vertical direction for the same measurement as shown in Figure 1. The grey value of each pixel represents the slope value (pure black represents a slope of  $-7 \mu\text{m}/\text{mm}$  and pure white represents a slope of  $+7 \mu\text{m}/\text{mm}$ ; values outside this chosen range are shown in yellow and blue). The area shown here measures circa  $80 \times 40 \text{ mm}$   
*Valori della curva locale in direzione verticale per la stessa misura di fig. 1. Il valore grigio di ogni pixel rappresenta il valore della curva (il nero rappresenta una curva di  $-7 \mu\text{m}/\text{mm}$  e il bianco una curva di  $+7 \mu\text{m}/\text{mm}$ ; i valori esterni al range selezionato sono visibili in giallo e in blu). L'area mostrata qui misura circa  $80 \times 40 \text{ mm}$*

is the fact that at equal tear length, the visibility of the tears is considerably reduced for the SCA-modified coating.

**USING PSD TO DETERMINE THE DEVELOPMENT OF SAG AND LEVELLING IN DRYING PAINTS**

As described above, PSD can even be used to determine how the surface profile of a wet paint layer develops with time. As far as we know, allnex is the first to show examples of the use of PSD to determine sag and levelling of paints in a quantitative way. Figure 4 summarizes the results of PSD tests of a freshly-sprayed solvent borne paint. In one experiment the panel was allowed to level horizontally. In the other test, the panel was placed vertically and in this case also the degree of sagging was determined as a function of time. The degree of sagging is given as waveshift defined as the displacement of the

surface profile in the direction of gravity<sup>[4]</sup>. As expected the increase of waveshift slows down during drying due to evaporation of solvent. Figure 4 also shows the development of the appearance of the applied paint layer as a function of time for both tests. We have found that the results of PSD tests correlate well with those of the Wavescan apparatus often used in the automotive industry to determine appearance of coatings. In Figure 4 the development of appearance is illustrated by the Wc (1 – 3 mm) and Wd (3 - 10 mm) values. As expected, the decrease of the Wc roughness occurs significantly faster than the Wd roughness. Surface roughness levels out faster for the horizontal test which is especially visible for Wd. The paint of the example above was spray-applied on



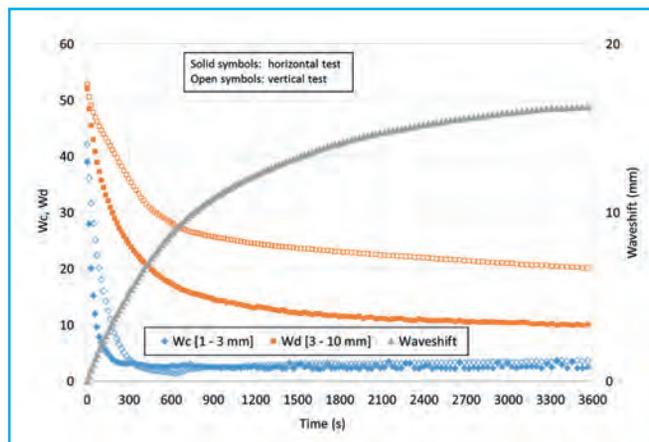
**Fig. 3** Some illustrative examples of using PSD to determine the surface profile of coatings. See text for details *Alcuni esempi dell'utilizzo di PSD per determinare il profilo superficiale dei rivestimenti (leggere testo per i dettagli)*

delle linee di colatura attorno ai fori. Come previsto, lo spessore del film essiccato (DFT) è risultato superiore in CC con SCA nei punti con lunghezza uguale della linea di colatura. Ciò che sorprende è il fatto che a uguali lunghezze della linea di colatura, la visibilità delle gocce è notevolmente ridotta nel rivestimento modificato con SCA.

**PSD PER DETERMINARE LO SVILUPPO DELLA COLATURA E DEL LIVELLAMENTO NELLE**

**PITTURE IN ESSICCAZIONE**

Come descritto sopra, PSD può essere utilizzata anche per determinare come si sviluppa nel tempo il profilo superficiale di uno strato bagnato di pittura. Per quanto è dato sapere, la società allnex è stata la prima a fornire esempi dell'utilizzo di PSD per determinare i fenomeni di colatura e di livellamento nelle pitture in modo quantitativo.



**Fig. 4** PSD measurement of the development of appearance (degree of levelling) for two freshly-sprayed layers of a solvent borne DIY paint applied on glass panel. The appearance is shown here as the Wc (diamonds) and Wd (squares) Wavescan values. The solid and open symbols represent the data for the horizontally and the vertically oriented panels, respectively. Identical spray conditions were used for both panels. The grey triangles denote the waveshift determined for the vertical test. *Misura PSD dell'evoluzione delle caratteristiche estetiche (grado di livellamento) di due strati appena applicati a spruzzo di una pittura fai-da-te a base solvente, applicata su un pannello di vetro. L'aspetto è illustrato dai valori Wavescan Wc (diamante) e Wd (quadrati). I simboli pieni e aperti rappresentano i dati dei pannelli orientati in direzione orizzontale e verticale. Sono state adottate le medesime condizioni di applicazione a spruzzo per entrambi i pannelli. I triangoli grigi denotano le variazioni dell'onda per il test in verticale*

In Figura 4 sono riportati schematicamente i risultati dei test PSD di una pittura a base solvente appena applicata a spruzzo. In un esperimento il pannello è stato posto in modo da ottenere il livellamento orizzontale. Nell'altro test, il pannello è stato posizionato in direzione verticale e in questo caso anche il grado di colatura è stato determinato in funzione del tempo. Il grado di colatura è dato da una variazione dell'onda definita come dislocazione del profilo superficiale in base alla forza di gravità<sup>[4]</sup>. Come previsto, l'aumento della variazione dell'onda rallenta durante l'essiccazione, a causa dell'evaporazione del solvente. Figura 4 mostra lo sviluppo delle proprietà estetiche dello strato di pittura applicato in funzione del tempo, per entrambi i test. E' stato riscontrato che i risultati dei test PSD concordano con quelli dell'apparato Wavescan, spes-

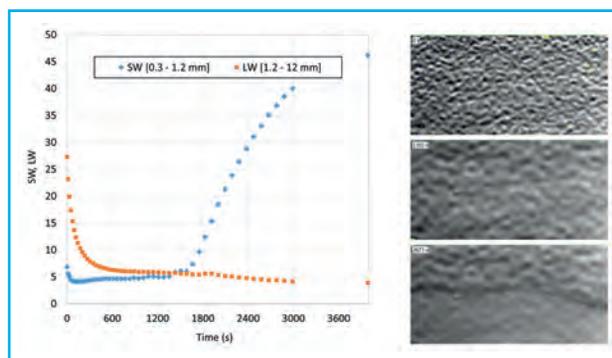
a smooth glass substrate and the appearance was found to improve with time. Figure 5 shows an example where this is not the case. Here a waterborne DIY paint was sprayed on Q-panel and allowed to dry horizontally. Initially both the SW and the LW values decrease with time. After about 1400 s, a sharp increase of SW is visible whereas at the same time the LW shows a small further decrease. From the surface profile after 2673 s shown on the right-hand side of Figure 5, a drying front is clearly visible. This drying front propagates over the paint surface and causes the sharp increase of SW. This paint was applied on Q-panel having small surface scratches which are telegraphed to the paint surface. It is well known that telegraphing issues in waterborne paints mainly develop during the final drying stage<sup>[5]</sup>. It is likely that similar surface structures will also be telegraphed if this waterborne paint is applied on e.g. sanded primer layers.

## SUMMARY AND CONCLUSIONS

In this article we presented a new optical technique (PSD) offering a very powerful way to determine the surface profile of specular surfaces in a quantitative manner. Several examples were shown in which PSD was used to determine the appearance of coatings including analysis of surface defects. An important advantage of PSD is that it also enables the quantitative determination of the development of the surface profile of wet paints during drying and curing. Some examples of PSD tests of paints during the drying stage were shown. Such measurements provide very valuable information and insights into the dominant parameters determining the final appearance of coatings.

## REFERENCES

- [1] C. Faber, Progress in modern optics 47, 2012.
- [2] G. Butel, Thesis University of Arizona, 2013.
- [3] M. Ziebart, et al, Pattern Recognition. 36th German Conf. Proceedings, Münster, Germany, 2014.
- [4] M. Bosma, R. Brinkhuis, J. Coopmans, B. Reuvers, Prog. Org. Coatings, vol 55, pp. 97-104, 2004.
- [5] M. Winnik, J. Feng, J. Coat. Technol., vol 68 (852), pp 39-50, 1996.



**Fig. 5** PSD measurement of the development of appearance for a freshly-sprayed waterborne DIY paint applied on Q-panel and allowed to dry horizontally. The appearance is shown here as SW (diamonds) and LW (squares) Wavescan values. Right: surface profiles at 0 s (top), 1355 s (middle) and 2673 s (bottom) A sinistra: misura PSD dell'evoluzione delle caratteristiche estetiche di una pittura fai-da-te a base acquosa appena applicata a spruzzo su pannello Q, essiccata in direzione orizzontale. L'aspetto è illustrato dai valori wavescan SW (diamanti) e LW (quadrati). A destra: profili superficiali a 0 s (in alto), 1355 s (al centro) e 2673 s (in basso)

so utilizzato nell'industria automobilistica per determinare l'aspetto dei rivestimenti. In Figura 4 l'evoluzione delle qualità esteriori è illustrata dai valori Wc (1-3 mm) e Wd (3-10 mm), dove il decremento della rugosità Wc ha luogo molto più velocemente rispetto a Wd. La rugosità superficiale si livella più velocemente nel test orizzontale, in particolare per quanto concerne Wd. La pittura dell'esempio riportato sopra era rappresentata da un prodotto applicato a spruzzo su un substrato di vetro levigato in cui le qualità estetiche sono migliorate nel corso del tempo. In Figura 5 è rappresentato un caso differente di una pittura Fai-da-te a base

acquosa applicata a spruzzo su un Pannello Q, essiccata in posizione orizzontale. Inizialmente sia i valori SW che quelli LW sono diminuiti gradualmente, mentre, dopo circa 1400 s, è stato osservato un marcato incremento di SW, diversamente da LW caratterizzato da un lieve decremento. Dopo 2673 s dal profilo superficiale presentato nella sezione a destra di Figura 5 appare chiaramente un'area in essiccazione. Questa stessa si propaga sulla superficie della pittura causando un forte incremento di SW. Questa pittura era stata applicata su Pannello Q su cui erano presenti piccole incisioni superficiali, visibili anche sulla superficie della pittura. È noto a tutti che il problema della sovraimpressioni nelle pitture a base acquosa si pone durante l'ultima fase dell'essiccazione<sup>[5]</sup>. È probabile che questo stesso problema insorga con simili strutture superficiali se la pittura a base acquosa viene applicata, ad esempio, su strati di primer carteggiato.

## CONCLUSIONI

In questo articolo è stata illustrata una nuova tecnica di analisi ottica (PSD), molto efficace per determinare il profilo superficiale delle superfici speculari, in modo quantitativo. Sono stati presentati diversi esempi in cui la PSD è stata adottata per valutare le caratteristiche estetiche dei rivestimenti, compresa l'analisi dei difetti superficiali. Un vantaggio importante offerto dalla PSD è che essa permette di determinare quantitativamente lo sviluppo del profilo superficiale delle pitture bagnate durante il processo di essiccazione e di reticolazione. Sono stati forniti inoltre alcuni esempi di test di PSD sulle pitture durante la fase di essiccazione. Queste misure danno informazioni e dati validi sui parametri dominanti che determinano l'aspetto finale dei rivestimenti.