

# L'automatització en la indústria ceràmica

VICENT CANTAVELLA

GUSTAVO MALLOL

Institut de Tecnologia Ceràmica, Universitat Jaume I

## 1. Introducció

La indústria ceràmica ha aconseguit un elevat grau de maduresa, i una prova d'aquest fet és el creixent interès del sector ceràmic pel control i la instrumentació dels processos, comparat amb altres sectors com la vaixel·la o els sanitaris (Reh, 1998: 7-11). En tot cas, si es compara el sector ceràmic amb la indústria química, en aquesta última el control de processos està molt més desenvolupat. Això es deu bàsicament a diverses raons:

- Les indústries químiques solen treballar més amb fluïts, i les operacions en les que intervenen fluïts són més conegudes que aquelles que impliquen sòlids.
- Les característiques finals exigides al producte final són moltes i molt variades: baixa porositat, resistència al desgast, resistència a càrregues, brillantor, estabilitat dimensional, etc.; a diferència del que passa amb els processos químics, en els quals el més important és la composició i la producció.
- L'elevada quantitat de models que actualment fabriquen les empreses. Desenvolupar un sistema de control que permeti treballar amb gran quantitat de models, amb molts canvis en les condicions d'operació implica dissenyar un sistema molt flexible i complex.

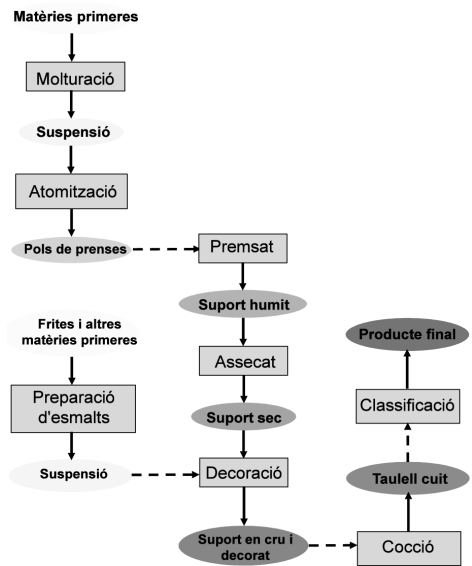


Figura 1. Procés de fabricació de taulells premsats i esmaltats, per monococcia via humida.

El procés ceràmic contempla una sèrie d'etapes (figura 1), que es desenvolupen de manera bàsicament seqüencial, de forma que l'eixida d'una d'elles constitueix l'entrada de la següent. Així, per exemple, la pols atomitzada és un producte intermediari, perquè constitueix l'eixida del procés d'atomització i és l'entrada del procés de premsat. Això fa, en particular, que les característiques del producte final depenguin de cadascuna de les etapes individuals, en major o menor mesura.

## 2. Nivells d'implantació del control en la indústria ceràmica

A nivell genèric i abstracte, el control consisteix a definir una o diverses variables que s'han de mesurar i una o diverses variables que s'han de modificar per tal d'aconseguir que el procés funcione segons les especificacions desitjades. La seqüència constituïda per mesura, comparació amb consigna i actuació correctiva és el que s'anomena llaç de control, i és l'element bàsic de qualsevol sistema de control, tant manual com automàtic.

Quan es parla de control en la indústria ceràmica es poden entendre diverses coses, des de simplement els sistemes que ja estan integrats en una màquina en el moment de la seua compra, fins un control més global en què es té en compte la interacció entre les diferents etapes productives. Per tal de clarificar aquesta varietat en quant a la implementació del control cal definir una sèrie de *nivells* de control (Mallo, 2006: Con47-Con72). En el nivell inferior es trobaria el control purament manual, i en el superior un control automàtic global, que involucraria totes les etapes productives així com les seues interaccions (figura 2).

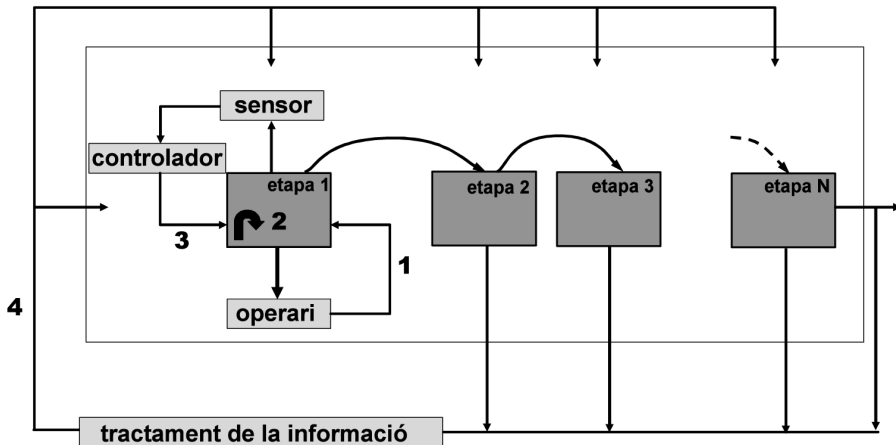


Figura 2. Nivells d'automatització.

### 2.1. Nivell 1: control manual

En el nivell més bàsic de control trobem l'actuació manual. Un operari du a terme la mesura d'alguna o algunes variables i, en funció de les especificacions del producte (consignes), modifica de manera manual una sèrie de variables. Exemples d'aquest tipus d'accions es troben en la major part d'empreses que fabriquen pols atomitzada, en les que el control de la humitat de la pols es realitza de forma manual, amb una balança d'infrarojos, que permet mesurar el pes de la pols inicial (humida) i després d'assecar. En funció de la diferència entre la humitat mesurada i la desitjada (consigna) s'actua sobre la temperatura d'entrada dels gasos a l'atomitzador.

## 2.2. Nivell 2: Control automàtic de les variables de màquina

La complexitat de moltes màquines actuals (assegador, premses, forns, etc.) fa que en totes elles existisca cert control *de sèrie*. Aquest control involucra *variables de màquina*, per oposició a les *variables de producte*, que són les característiques del material que s'està produint; és a dir, per tal d'establir aquests llaços no es requereixen coneixements del producte que s'està fabricant.

Dins d'aquest nivell de control es troben multitud d'equips, com per exemple la premsa, on la *variable de màquina* que es controla és la pressió de premsat, mentre que les *variables de producte* que interessa regular són la densitat aparent i l'espessor de la peça.

És característic d'aquest nivell l'ús de sistemes de control com els controladors o els autòmats programables (PLC). El ràpid desenvolupament que ha tingut la informàtica en les dues últimes dècades ha fet que moltes de les màquines de certa complexitat disposen d'ordinadors incorporats. Desafortunadament, malgrat la potència d'aquests dispositius, en la majoria dels casos s'utilitzen com simples registradors de dades, quan podrien tindre un paper molt més actiu.

## 2.3. Nivell 3: Control automàtic de les variables de producte

En el tercer nivell del control es troba la regulació de les *variables de producte*. Aquest nivell implica, al menys, dues àrees de coneixement diferents: la dels materials i processos, i la d'instrumentació.

El coneixement dels materials i dels processos involucrats en la fabricació de frites i taulells ceràmics es troba suficientment avançat com per a implantar un sistema de control en la major part dels casos. Això es deu, en part, a que per a dur a terme el control és suficient disposar d'un model aproximat. Tècniques generals com el disseny d'experiments o la identificació empírica de paràmetres poden permetre obtindre el coneixement necessari per a realitzar un control automàtic.

Les majors dificultats del control automàtic es troben, en quasi tots els casos, en disposar del sensor adequat per a realitzar la mesura o en definir les variables sobre les que actuar. La selecció d'un nou sensor sol ser un procés complex, perquè deu funcionar amb la suficient precisió i fiabilitat en un camp, el de la indústria ceràmica, per al que, amb tota probabilitat, no va ser dissenyat originàriament. Casos típics es tenen en els sensors d'humitat per infrarojos, dissenyats originàriament per a mesurar la humitat en les fulles de tabac; els sensors de radiofreqüència, utilitzats en la indústria del guix i la fusta, o els sensors de densitat per bombolleig, aplicats en la indústria de la mineria.

En els casos més senzills, aquest control es pot dur a terme amb controlador convencionals (els PID) o amb autòmats programables; tanmateix, a mesura que les equacions que regeixen els processos són més complicades, o es volen tindre en compte més interaccions entre variables, s'ha de recórrer als ordinadors. En altres sectors industrials, els ordinadors s'utilitzen per al control anticipatiu, predictiu, sistemes experts o per a la simulació dinàmica (Peña, 1998: 139-145). En l'actualitat l'ús de models d'aquest tipus només s'aplica en el sistema de classificació automàtica de taulells. Encara que s'han desenvolupat per a l'aplicació d'aquests sistemes avançats en el control de processos, aquests desenvolupaments no estan massa difosos en l'actualitat.

## **2.4. Nivell 4: control global**

Les diferents operacions que constitueixen el procés ceràmic (molturació, assecat per atomització, premsat, assecat, etc.) no són independents; con s'ha indicat abans, l'eixida d'una representa l'entrada de la següent. Així, per exemple, el control de la humitat de les pols de premses condiona la densitat aparent dels suports premsats, la qual, per la seua banda, influeix en la contracció de les peces durant la cocció.

La incorrecta execució de qualsevol de les etapes del procés no només afecta el desenvolupament de les etapes posteriors, sinó també les característiques dels productes intermedis. El procés de fabricació de taulells s'ha de considerar com un conjunt d'etapes interconnectades que, progressivament, van transformant les matèries primeres en el producte acabat. El control automàtic ni es pot ni s'ha de limitar a les etapes individuals. El control global del procés és una filosofia, l'aplicació de la qual permetria disposar d'informació (i no només dades) del procés, optimitzar globalment la fabricació dels taulells i detectar els punts febles.

En la indústria ceràmica s'està començant a abordar aquest quart nivell, encara que de forma incipient. Actualment la major part d'actuacions de control global es limiten a l'adquisició d'informació. Cada vegada són més nombroses les empreses que disposen de sistemes centralitzats en els que els operaris de cada etapa introdueixen les dades del procés, es té una indicació del nombre de peces processades i es fa un seguiment de les peces al llarg del procés.

Desafortunadament n'hi ha aspectes clau que no s'han abordat: és virtualment impossible intercomunicar moltes de les màquines degut a que els fabricants de maquinària utilitzen protocols de comunicacions tancats; d'aquesta manera es garanteix l'exclusivitat del fabricant de maquinària: cap altra empresa (ni tan sols aquella en la que s'ha instal·lat la màquina) podrà establir comunicacions lliurement o integrar-la en una xarxa major.

Un control global hauria de contemplar també una actuació global; és a dir, l'adquisició de variables de procés i la seua manipulació i no únicament l'adquisició de la informació relacionada amb la productivitat de les màquines. La tecnologia existent en l'actualitat permet donar aquest pas.

## **3. Control i automatització de les diferents etapes del procés**

### **3.1. Molturació**

L'objectiu de la molturació és l'obtenció d'una suspensió homogènia de sòlids en aigua amb una distribució de volum de partícula escaient per a la realització de les etapes posteriors (premsat, assecat, etc.), compatible amb una elevada quantitat de sòlids i una viscositat correcta perquè l'operació següent (atomització) siga òptima (Blasco, 1986: 37-41).

La granulometria del sòlid que integra la suspensió condiona el comportament de la peça durant el seu processat (compacitat, permeabilitat, etc.) i determina alguns dels paràmetres de la peça acabada (dimensions finals, porositat, etc.). La mesura de la distribució del volum de partícules és complexa i costosa, raó per la qual en compte de

determinar aquesta distribució, industrialment es mesura únicament el residu (percentatge de partícules per damunt d'un volum donat, habitualment 40 o 63  $\mu\text{m}$ ). Aquesta mesura es realitza de forma manual.

La densitat de la suspensió determina, en gran mesura, el rendiment energètic de l'etapa d'atomització i, per tant, ha de tindre el valor més elevat possible. Tanmateix, per a una composició donada, en augmentar la densitat també ho fa la viscositat, i valors elevats d'aquesta última variable dificulten el buidat del molí, poden conduir a l'aparició d'anomalies durant el funcionament (formació de corfes en la paret interna del molí i d'aglomerats de boles i material a molturar), disminueixen la velocitat de tamisatge i influeixen negativament en l'atomització. Per tot açò, en l'etapa de molturació s'intenta aconseguir una densitat de la suspensió el més elevada possible, mantenint una viscositat que permetisca el seu processament.

Cal distingir entre la molturació que es realitza en molins continus d'aquella que es du a terme en molins discontinus (tipus Alsing). L'automatització és molt més fàcil en els primers que en els segons; per tant, en aquest apartat la discussió se centrarà en els continus.

Les variables de màquina (cabals de sòlids, aigua i desfloculant) es mesuren de forma automàtica. Segons la diferenciació en nivells presentada en la introducció, es podria considerar que la molturació en continu es troba en el *nivell 2*. En aquests darrers anys ha hagut un esforç important per a implementar el control automàtic de la densitat i la viscositat de la suspensió, deixant de banda el control del residu (Sánchez, 2002: GI219-GI236; Moschini, 2004: GI67-GI80). La idea del control automàtic en els molins continus consisteix a mesurar de forma automàtica la densitat i la viscositat, que en l'actualitat es mesuren de forma manual, i actuar sobre els cabals d'aigua i desfloculant.

La principal dificultat del control automàtic d'aquesta operació és la selecció d'elements de mesura de la densitat i la viscositat fiables, donades les exigents condicions industrials de l'operació. En l'actualitat la mesura de la densitat de suspensions es pot considerar un problema resolt amb la utilització dels densímetres d'efecte Coriolis (figura 3).

La tendència de futur del control d'aquest etapa passa pel disseny d'un sistema de control avançat que mesure densitat, viscositat i fins i tot residu. Les dificultats són múltiples: interacció entre els llaços de control de la densitat i viscositat, posta a punt d'un sensor de viscositat, etc. La incorporació del residu, encara que tècnicament possible, planteja dificultats que probablement no siguen resoltes a curt termini. El sistema de control, necessàriament, hauria de ser suficientment intel·ligent per a gestionar la interacció entre totes les variables, la qual cosa no és possible utilitzant només controladors convencionals (PID).



Figura 3. Densímetre d'efecte Coriolis.

### 3.2. Assecat per atomització

L'assecat per atomització de la suspensió preparada després de la molturació és el procediment de granulació més difós en el sector de taulells ceràmics a Espanya i Itàlia per a obtenir la pols de premses. Dues són les variables més importants de la pols de premses: el seu contingut en humitat i la seua granulometria.

La humitat determina, juntament amb la pressió màxima de premsat, la densitat aparent del suport que, com es veurà posteriorment, és una de les variables més importants de tot el procés productiu. La relació quantitativa entre densitat, pressió de premsat i humitat constitueix el *diagrama de compactació* (Amorós, 1987).

La distribució de volum dels grànuls determina la fluïdesa de la pols, la qual incideix sobre el seu comportament, fonamentalment durant l'ompliment de l'alvèol de la premsa (Amorós, 1988: 273-282; Amorós, 1990: 151-158). Una adequada fluïdesa de la pols condueix l'ompliment homogeni de l'alvèol de la premsa i a una distribució uniforme de la densitat aparent del suport compactat. Si la densitat aparent és uniforme, el comportament del suport durant el seu processat també ho serà i, el que és més important, la geometria del producte final serà l'adequada.

S'han dut a terme treballs (Jarque, 2000) que han suposat un avanç important en el control de la parella de variables  $T_{A0}$  (temperatura de consigna de gasos d'entrada a l'atomitzador) i  $X$  (humitat de la pols atomitzada). En l'actualitat són moltes les empreses que disposen de sensors d'humitat per infrarojos per a mesurar la humitat de la pols atomitzada, encara que són bastant menys les que utilitzen aquest senyal per a tancar el llaç de control i actuar sobre l'atomitzador de forma automàtica (figura 4).

La distribució granulomètrica es podria mesurar de forma automàtica; tanmateix, existeixen dos factors que dificulten el control d'aquesta variable: l'elevat cost del sensor i el fet que, amb el disseny actual de l'atomitzador i, en particular, de les boquilles, no és possible modificar fàcilment la distribució granulomètrica.

### 3.3. Premsat

La variable de procés més important relacionada amb les característiques del suport premsat és la seua densitat aparent. Aquesta densitat ha de ser la mateixa per a totes les peces premsades, i ha de ser constant dins d'una peça.

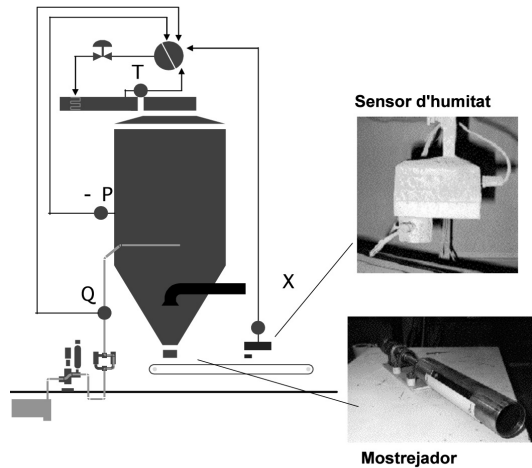
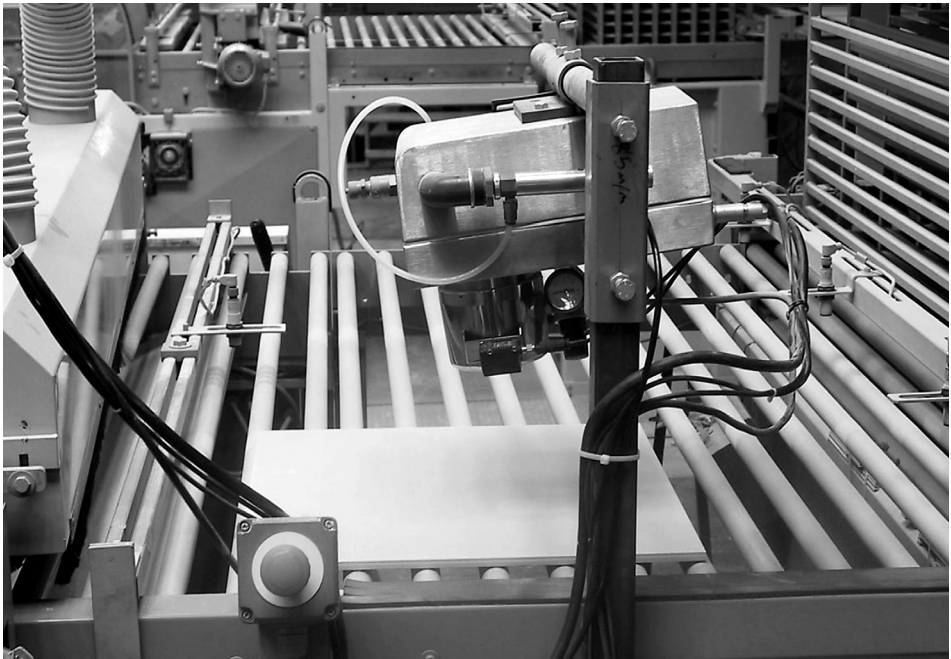


Figura 4. Control automàtic de la humitat de la pols granulada a l'eixida de l'atomitzador.

La densitat aparent influeix en el comportament de la peça durant les etapes posteriors al premsat i condiona algunes de les més importants característiques del producte final. La densitat aparent és la variable macroscòpica que reflecteix l'estructura porosa del suport, per tant determina, per a una mateixa composició, la seua permeabilitat als gasos, la seua resistència mecànica, el procés de sinterització, el seu mòdul d'elasticitat, etc. Un inadequat valor de la densitat aparent pot contribuir a l'aparició d'esquerdes durant l'assecat, trencaments en la línia d'esmaltat, cor negre, falta d'estabilitat dimensional, falta de planaritat o una inadequada porositat final (Amorós, 1987; Amorós, 1988: 273-282; Amorós, 1990, 151-158; Escardino, 1983: 317-329).



*Figura 5. Mesura en continu de la humitat dels suports a l'eixida de la premsa.*

L'homogeneïtat en la distribució de la densitat aparent ha millorat molt en els darrers anys amb la utilització dels plats hidràulics. Encara que la falta d'uniformitat no ha desaparegut per complet, la principal preocupació se centra en l'actualitat en la diferència de densitat aparent entre peces.

Hui en dia la mesura de la densitat aparent es realitza de forma manual o semiautomàtica, mitjançant el procediment d'immersió en mercuri. S'han realitzat treballs (Enrique, 1997: 18-27) per a intentar substituir aquest assaig, donat el seu caràcter discontinu, manual, destructiu i nociu, sense que de moment cap d'aquestes alternatives l'haja substituït. Entre les línies de recerca cal indicar l'ús d'ultrasons (Cantavella, 2006: P.BC165-P.BC178), raigs X (Amorós, 2006: P.BC69-P.BC82) o la immersió en aigua amb membranes protectores (per a evitar la degradació de la peça en cru per l'efecte de l'aigua); aquest darrer mètode és el que es troba en un estadi més avançat.

Pel que respecta a la mesura en línia, s'han fet treballs basats en l'ús dels sensors d'ultrasons (Marchetti, 2002: GI11-GI23), encara que aquest sistema no es troba en condicions de ser utilitzat industrialment. També s'ha abordat la instal·lació de sensors extensiomètrics en el plat de la premsa per a mesurar la distribució de la pressió en els suports durant la seua compactació, junt amb l'ús de sensor d'humitat per infrarojos per a determinar la humitat de la pols de premses (Blasco, 1992a: 424-238); tanmateix la complexitat mecànica del sistema va fer que no tinguera aplicació industrial com a sistema de control

Una forma alternativa d'abordar el problema de l'estabilitat de la densitat aparent consisteix a mesurar la causa que provoca la major part de les fluctuacions de densitat: els canvis en la humitat de la pols atomitzada (figura 5). Con s'ha indicat abans, la densitat aparent depèn de la humitat i de la pressió de premsat, per tant, modificant la pressió de premsat es pot compensar l'efecte de la variació d'humitat i mantindre constant la densitat. A aquest tipus de control se l'anomena anticipatiu i ha sigut implantat industrialment, demostrant la seua viabilitat.

### 3.4. Assecat

L'assecat dels suports acabats de premsar permet reduir el seu contingut en humitat i aconseguir que tinguin una temperatura adequada perquè l'etapa de decoració es pugui efectuar correctament.

Les variables de procés a controlar relacionades amb els suports després de l'assecat són la seua temperatura i el contingut en humitat. Una humitat residual dels suports elevada (per damunt del 0,1%) redueix la seua resistència mecànica i dificulta l'operació de decoració. La temperatura afecta l'etapa d'esmlat: valors inadequats poden produir defectes (*punxats*) o una falta d'homogeneïtat en la distribució de l'esmlat sobre la superfície de les peces.

Tant la temperatura com la humitat de les peces a l'eixida de l'assecador depenen de la distribució de temperatura i, en menor mesura, de la humitat relativa dels gasos dins de l'assecador. La informació que es té de la corba de temperatura dins dels assecadors és molt fragmentària, especialment en els assecadors verticals.

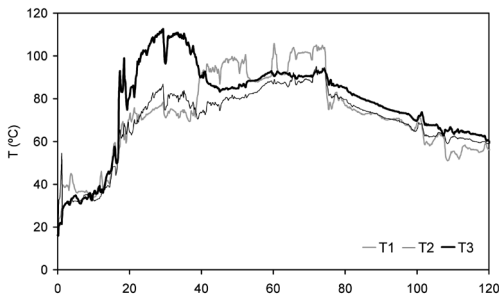


Figura 6. Distribució de la temperatura dels gasos a l'interior d'un assecador vertical durant un cicle d'assecat, en diferents posicions.

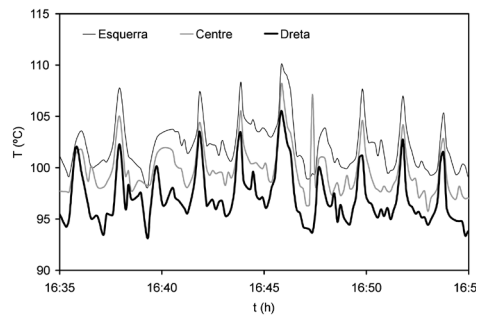


Figura 7. Evolució de la temperatura de tres peces, situades en diferents posicions, a l'eixida de l'assecador.



S'han desenvolupat sondes de temperatura que s'introdueixen en l'assecador i aporten informació de la corba de temperatura dels gasos o de la superfície de la peça (Jarque, 2002b: PGI365-PGI384). Aquestes sondes consisteixen en un equip d'adquisició de dades amb una sèrie de termoparells i s'utilitzen esporàdicament per al diagnòstic dels assecadors. En la figura 6 es mostra un perfil de temperatures típic obtingut en una d'aquestes sondes, i en tres posicions diferents.

La informació de la corba de temperatura dins d'un assecador permet detectar zones en les que l'assecat és massa lent (amb la consegüent pèrdua de rendiment) o massa ràpid (la qual cosa pot originar problemes de trencaments). Aquesta informació pot conduir a un disseny més racional de les corbes d'assecat.

La temperatura a l'eixida de l'assecador se sol mesurar amb piròmetres òptics amb un indicador en el que l'operari pot llegir el valor instantani de la temperatura. S'obté, per tant, una lectura puntual de la temperatura de la peça a mesura que passa per baix del piròmetre. És impossible, en aquestes condicions, conèixer la temperatura mitjana d'una peça situada en una determinada posició en l'assecador. Es pot utilitzar un sistema que combine la informació de temperatura mitjana de la peça a l'eixida de l'assecador amb la seua posició dins de l'assecador. En la figura 7 es mostra l'evolució de la temperatura mitjana a l'eixida de l'assecador de tres peces situades en posicions diferents. La utilització d'aquesta instrumentació no és complicada, especialment assecadors verticals, i aporta informació útil sobre el funcionament de l'assecador i la seua estabilitat tèrmica, tant en estat estacionari com no estacionari.

La segon variable d'importància en l'assecat industrial és la humitat residual dels suports. Aquesta humitat residual influeix en la resistència mecànica (Jarque, 2001) de les peces: a major humitat, menor resistència mecànica i, per tant, major la probabilitat de que la peça experimente algun tipus de fractura. La humitat residual se sol mesurar de forma manual, a partir de provetes obtingudes de les peces industrials, que s'introdueixen en una balança amb resistències elèctriques o en una estufa determinant la massa en humit i en sec. Els sensors d'humitat per infrarojos, utilitzats en la mesura del contingut d'humitat de la pols de premses i dels suports ceràmics premsats (per al control anticipatiu de la densitat) no es poden utilitzar en aquest cas, ja que la radiació infraroja és poc penetrant i sols permet conèixer la humitat en la superfície de la peça. Per a mesurar la humitat mitjana s'han d'utilitzar sensors de microones o de radiofreqüència. L'experiència en el sector dels taulells ceràmics és major en aquest últim cas; els assajos realitzats han posat de manifest que es poden emprar aquests dispositius per a obtenir mesures precises de la humitat residual dels suports a l'eixida de l'assecador.

### **3.5. Esmaltat i decoració**

Aquesta operació no és una sola etapa, sinó un conjunt de subetapes concatenades. Cadascuna de les subetapes té les seues pròpies variables independents, encara que existeixen interaccions entre les diferents subetapes; per exemple, la quantitat d'aigua aplicada amb aerògraf influeix sobre la qualitat de l'aplicació de l'esmalt base.

S'han realitzat esforços per implementar un sistema de seguiment i fins i tot de control



Figura 8. Distribució de cabals volumètrics d'esmalt amb control manual i automàtic.

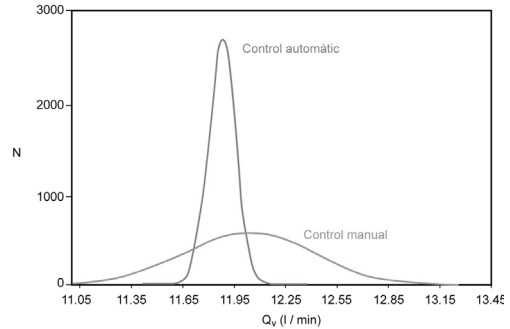


Figura 9. Distribució de cabals volumètrics d'esmalt amb control manual i automàtic.

d'aquestes subetapes, en particular de la mesura de la quantitat d'esmalt aplicat, utilitzant cèl·lules de càrrega. Els resultats obtinguts van posar de manifest la dificultat de fer mesures suficientment precises del pes de les peces abans i després de cada aplicació.

Major èxit s'ha obtingut amb el control de la quantitat d'esmalt aplicat mitjançant campana (figura 8) utilitzant un cabalímetre electromagnètic que mesura el cabal d'esmalt aportat per la campana i envia el senyal a un controlador que corregeix les desviacions actuant sobre una vàlvula motoritzada. En la figura 9 es pot observar la distribució de valors de cabal que passa a través de la campana quan el funcionament és manual (la vàlvula és regulada per un operari) i quan és automàtic (la regulació és feta pel controlador).

Recentment s'ha desenvolupat un sistema alternatiu que permet obtenir valors estables de cabal sense sistema de control, i que es basa en un disseny de la vàlvula que minimitza les pèrdues per fricció (Boix, 2008: P.BC157-P.BC170).

### 3.6. Cocció

La cocció és una de les etapes més importants del procés ceràmic, ja que en ella es confereix a les peces les seues característiques tècniques i estètiques finals i, a més a més, és l'etapa tèrmica de major consum energètic. Les variables del forn sobre les que és possible actuar, i que determinen tant les característiques de les peces com el seu consum, són: la distribució de temperatura tant longitudinalment com transversalment, la pressió i la composició dels gasos en l'interior del forn, fonamentalment la quantitat d'oxigen.

En general, encara que ha hagut intents de controlar la corba de pressions i fins i tot del percentatge d'oxigen dels gasos a l'interior del forn (Blasco, 1992b: 424-438; Blasco, 1993: 716-729), sols la temperatura és mesurada i controlada de forma continua al llarg del forn. Malgrat això, moltes vegades aquesta mesura és insuficient i les diferències de temperatura en sentit transversal (entre esquerra, centre i dreta) són importants. Existeixen dos equips que permeten mesurar la distribució transversal de temperatura: el corró multitermoparell (Ferrer, 1994: 653-662) i la sonda de temperatura *Datapaq*.

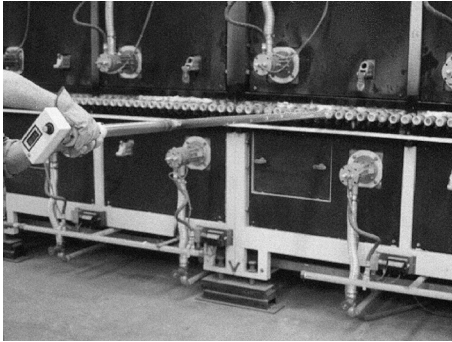


Figura 10. Mesura de gradients transversals de temperatura amb el corró sensoritzat.

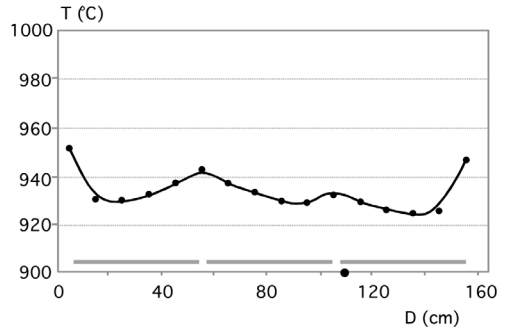


Figura 11. Gradients transversals de temperatura a l'interior del forn.

El corró multitermoparell externament té l'aparença d'un corró metàl·lic convencional, però al seu interior disposa d'uns termoparells (figura 10) amb els que és possible mesurar el perfil transversal en una zona del forn, en la part inferior i en continu (figura 11). Qualsevol canvi o maniobra en el forn (modificació de la temperatura de consigna, pressió de l'aire dels cremadors, diàmetre o tipus de tovera dels cremadors, etc.) afecta el perfil de temperatura i, mitjançant aquest sistema, es pot analitzar la seua influència. Si es desitja estudiar un altra zona del forn sols s'ha de canviar la posició del corró.

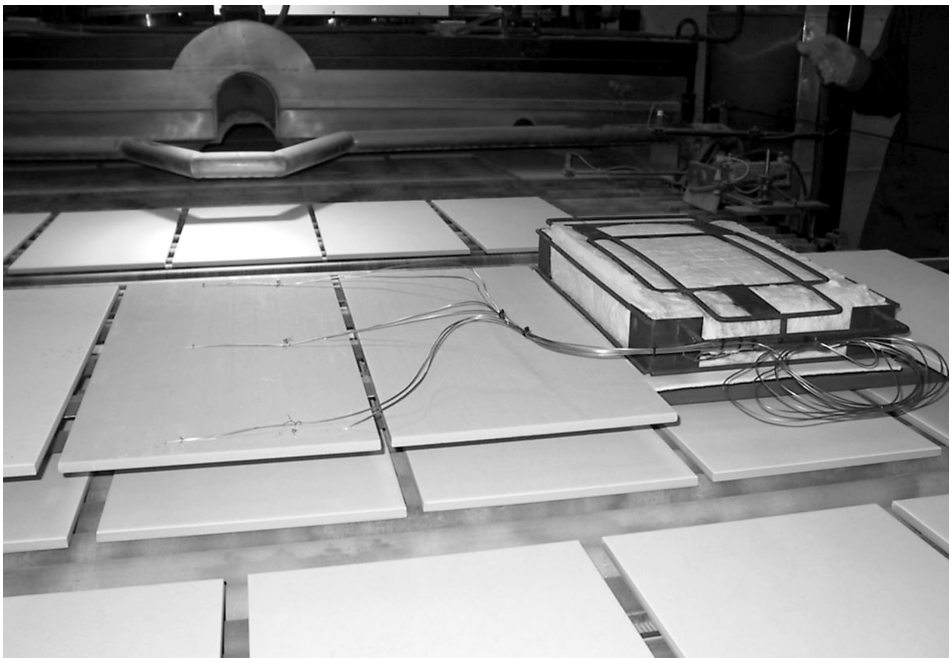


Figura 12. Sonda de temperatura Datapaq a l'entrada d'un forn.

La sonda de temperatura *Datapaq* (figura 12) informa de la corba de temperatura completa, en diferents posicions a l'ample del forn. Consisteix en un dispositiu electrònic convenientment aïllat tèrmicament, al que es connecta una sèrie de termoparells que se situen sobre les peces. El conjunt s'introdueix en el forn i permet obtenir la distribució de temperatura de manera anàloga a com ho fa la sonda utilitzada per a assecadors. Depenent de la col·locació dels termoparells es pot enregistrar la temperatura de la superfície de la peça (superior i inferior) o la dels gasos del forn. Els principals inconvenients de l'equip són la preparació de la mesura, que és laboriosa, i la dificultat de garantir que la introducció de la sonda no pertorbe excessivament la distribució de temperatures.

Les corbes de temperatura, pressió i percentatge d'oxigen no són les variables del producte cuit. Les variables que realment s'han de controlar són les dimensions (calibres i manca d'ortogonalitat), curvatures i aspecte visual (tons, defectes superficials i trencaments). El problema en molts casos és la mesura en continu d'aquestes propietats a l'eixida del forn, degut a les elevades temperatures que tenen les peces en aquest punt i al fet que algunes d'aquestes propietats poden modificar-se en el temps, com és el cas de les curvatures.

En l'actualitat existeixen dispositius per a la mesura en continu de les dimensions i, en principi, seria possible tindre informació de l'aspecte visual. S'han realitzat treballs en els que s'ha estudiat la relació entre les variables tèrmiques i les curvatures (Jarque, 2002a: 685-687); malgrat això, encara que es dispose de recursos tècnics capaços de mesurar en continu les propietats dels taulells cuits a l'eixida dels forns i es coneix, en molts casos, la zona del forn que incideix sobre la característica final del producte, no s'ha aconseguit un control automàtic. El major problema es troba en definir les variables sobre les que actuar i els *efectes secundaris* d'aquestes actuacions; així, per exemple, la modificació de la temperatura en una zona del forn per a corregir calibres podria afectar la tonalitat de les peces. El control de les curvatures, especialment de les irregulars, és encara més complex.

### 3.7. Classificació

La classificació és una de les etapes que darrerament ha experimentat canvis més significatius des del punt de vista del control automàtic. L'adveniment dels primers equips de classificació automàtica (Massen, 2001: E15-E17; Coe, 2000: 33, 35) ha fet que molts fabricants de maquinària oferisquen els seus propis equips de classificació. Diversos factors han provocat el recent èxit d'aquest tipus d'equips: l'aparició d'ordinadors ràpids, el desenvolupament de complexos algorismes de tractament de les imatges i les càmeres d'alta resolució.

La classificació de taulells ceràmics requereix tindre en compte una sèrie d'apreciacions, sobretot estètiques, que són difícilment quantificables en termes matemàtics i expressables en un algoritme. En l'actualitat, per a determinats tipus de models, els errors dels sistemes de classificació automàtics són inferiors als comesos pel personal de classificació, el qual, degut a la fatiga provocada per aquesta tasta, no pot discernir els defectes cromàtics després d'un curt període de treball.

#### 4. Conclusions

La indústria ceràmica és un sector madur des del punt de vista del producte; això ha fet que les empreses hagen realitzat esforços en els aspectes d'automatització i control de processos com a mètode per a reduir costos i augmentar producció i qualitat.

L'automatització està experimentant una evolució en la que el control basat en variables de màquina, on l'objectiu és regular les variables de funcionament dels equips (pressió de premsat, temperatura de cocció, etc.) s'està ampliant a variables de producte (densitat aparent, porositat, resistència mecànica, etc.), que són les que realment interessa controlar.

En el futur s'espera incrementar encara més el grau d'automatització, passant a un control global on es tindrà en compte la interacció entre les diferents etapes productives.

#### BIBLIOGRAFIA

- AMORÓS, J.L. (1987): *Pastas cerámicas para pavimentos de monococción: Influencia de las variables de prensado sobre las propiedades de la pieza en crudo y sobre su comportamiento durante el prensado y la cocción*. Tesis doctoral, Valencia, Universitat de València.
- AMORÓS, J.L. i altres (1988): «La operación de prensado en la fabricación de pavimento por monococción. I Influencia de la naturaleza del polvo de prensas sobre las propiedades de la pieza en crudo», *Boletín de la Sociedad Española de Cerámico y Vidrio*, 27(5), 273-282.
- AMORÓS, J.L. i altres (1990): «La operación de prensado de pavimentos por monococción. II Influencia de la naturaleza del polvo de prensas sobre las propiedades de la pieza en cocido», *Boletín de la Sociedad Española de Cerámico y Vidrio*, 29(3), 151-158.
- AMORÓS, J.L. i altres (2006): «Medida no destructiva de la densidad aparente de piezas en crudo mediante absorción de rayos X», *IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2006*, Castelló, Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, P.BC69-P.BC82.
- BLASCO, A. i altres (1986): «Los defloculantes y su acción en las pastas cerámicas para atomización», *Cerámica y cristal*, 98, 37-41.
- BLASCO, A. i altres (1992a): «Experimental Study of the determination of dry compaction of ware shaped by unidirectional pressing, in continuous operation and in true time», *Tile & Brick International*, 8(6), 424-438.
- BLASCO, A. i altres. (1992b): «Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (I). Curva de presiones», *Técnica Cerámica*, 206, 585-593.
- BLASCO, A. i altres (1993): «Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (II). Caudal de aire de combustión», *Técnica Cerámica*, 218, 716-729.
- BOIX, J. i altres (2008): «Desarrollo de un sistema de esmaltado insensible a las variaciones de la viscosidad del esmalte», *X Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico*, Castelló, Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, P.BC157-P.BC170.
- CANTAVELLA, V. i altres (2006): «Uso de la técnica de ultrasonidos para medir la densidad aparente de las baldosas en crudo y optimizar el proceso de prensado», *IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2006*,

- Castelló, Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, P.BC165-P.BC178.
- COE, S. (2000): «Automatic tile inspection», *International Ceramics*, 1, 33, 35.
- ENRIQUE, J.E. i altres (1997): «Alternativas al método de inmersión en mercurio para la determinación de la densidad aparente de baldosas cerámicas», *Técnica Cerámica*, 250, 18-27.
- ESCARDINO, A. i altres (1983): «Cinética de la oxidación de la materia orgánica en productos cerámicos prensados», *I Congreso Iberoamericano de Cerámica, Vidrio y Refractarios*, Arganda del Rey, Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 317-329.
- FERRER, C. i altres (1994): «Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato. III Medida de gradientes transversales de temperatura», *Técnica Cerámica*, 227, 653-662.
- JARQUE, J.C. (2001): *Estudio del comportamiento mecánico de soportes cerámicos crudo: Mejora de sus propiedades mecánicas*, Tesis doctoral, Castelló, Universitat Jaume I.
- JARQUE, J.C. i altres (2000): «Control automático de la humedad en una instalación de secado por atomización», *XL Congreso Nacional de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Onda, 8-11 de noviembre, 2000: programa y libro de resúmenes*, Castelló, SECV.
- JARQUE, J.C. i altres (2002a): «Influencia de las condiciones de operación del horno de rodillos sobre la curvatura de las piezas», *Técnica Cerámica*, 303, 685-687.
- JARQUE, J.C. i altres (2002b): «Comportamiento de composiciones cerámicas frente al secado en condiciones industriales», *VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2002*, Castellón, Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, vol. II, PGI365-PGI384.
- MALLOL, G. (2006): «Control y automatización en la industria azulejera: Evolución y perspectivas», *IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico*, Castelló, Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación - *Qualicer 2006*, Con47-Con72.
- MARCHETTI, B. i G.M. REVEL (2002): «Medida en línea de la densidad en crudo de baldosas cerámicas: análisis de incertidumbre», *VII Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico - Qualicer 2002*, Castelló, Cámara oficial de Comercio, Industria y Navegación, vol. I, GI11-GI23.
- MASSEN, R. i T. FRANZ (2001): «The quality of automatic tile quality inspection systems», *Cfi ber. DKG*, 78 (1-2), E15-E17.
- MOSCHINI, M. i altres (2004): «Medida en línea de la densidad y viscosidad de la barbotina», *VIII Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico - Qualicer 2004*, Castelló, Cámara oficial de Comercio, Industria y Navegación, vol. I, GI67-GI80.
- PEÑA DÍEZ, J.L. (1998): «La simulación dinámica en el control de procesos», *Ingeniería Química*, 348, 139-145.
- REH, H. i B. KROZINGER (1998): «Process technology in whitewares», *Cfi Ber DKG*, 75(10), 7-11.
- SÁNCHEZ, E. i altres (2002): «Control de la operación de molienda en continuo», *Actas del VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2002*, Castelló, Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación. vol. I, GI219-GI236.