

# Capítol 5 . Caracterització dels sensors.

El treball de mesura i caracterització elèctrica dels sensors d'acceleració persegueix dos objectius principals: El primer és l'estudi i avaluació dels efectes sobre els dispositius que puguin tenir cadascuna de les diferents etapes d'encapsulat dels sensors, des de la soldadura anòdica fins a l'encapsulat *flip-chip*. El segon objectiu és la caracterització completa dels acceleròmetres fabricats i encapsulats tant en TO-8 com en format multixip.

En el primer treball es tracta de mesurar els esforços mecànics que puguin afegir les successives etapes d'encapsulat. Aquest estudi s'ha realitzat principalment sobre el xip de test, el qual ha estat especialment dissenyat per ser més sensible als problemes d'esforços mecànics que volem detectar. La descripció i simulació d'aquest xip de test s'explica a l'apartat 3.3. L'altre part d'aquest estudi s'ha dut a terme sobre les estructures de test, anomenades *rosettes*, col·locades al marc dels acceleròmetres. La mesura d'aquestes estructures ens donarà els valors d'esforços mecànics que pateix la superfície del xip. Aquests resultats es compararan posteriorment amb les simulacions efectuades dels processos d'encapsulat del sensor i ens permetran validar les nostres simulacions. Per a poder realitzar aquest seguiment s'han fet mesures dels diferents elements de test, tant del xip de test com dels acceleròmetres, en tres moments del procés d'encapsulat. La primera mesura s'ha dut a terme sobre les oblies de dispositius un cop acabades i amb la soldadura anòdica ja realitzada, a continuació els xips s'han mesurat individualment i per últim, s'han tornat a mesurar quan els xips ja estaven muntats en format MCM.

L'objectiu d'una caracterització exhaustiva dels acceleròmetres és el poder establir si l'encapsulat MCM modifica els valors de sortida del sensor. Per aquest motiu els acceleròmetres van ser sotmes a una caracterització estàtica i dinàmica encapsulats en el seu format habitual, en TO-8, i muntats en un mòdul multixip. Per últim, els resultats de la caracterització dels acceleròmetres es va comparar amb els resultats esperats obtinguts a partir de les simulacions amb el programa ANSYS.

### 5.1 Extracció paràmetres tecnologia de sensors.

Al joc de màscares CNM149, destinat a la fabricació d'acceleròmetres, es van incloure elements de test per a la caracterització de la tecnologia de sensors piezoresistius. L'estructura que es va implementar és la que es mostra a la Figura 5.1.b). Es tracta d'un *Cross Bridge Resistor (CBR)* per l'extracció tant de la resistència quadre de les piezoresistències, ( $R_{\#Pz}$ ), com de l'amplada d'aquestes, ( $W_{Pz}$ ). A la vegada que es combina amb una estructura KELVIN per a la mesura de la resistència de contacte de l'alumini ( $R_{c\_Al}$ ). Aquest element es va incloure únicament al xip de test de la CNM149.

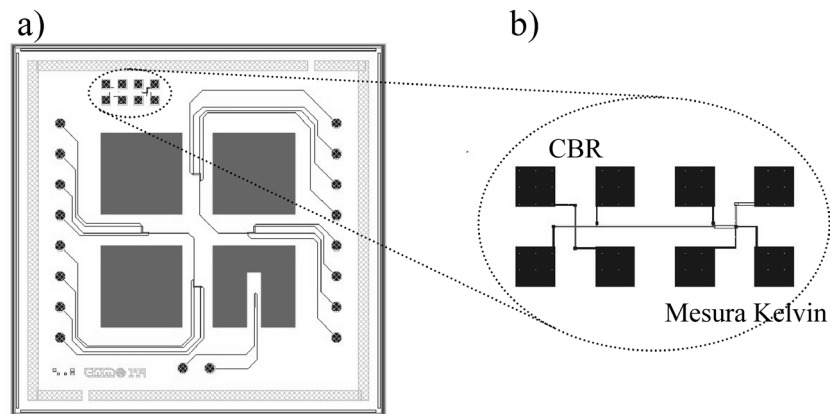


Figura 5.1: a) Layout del xip de test inclòs al joc de màscares CNM149. b) Detall de l'estructura de test per la caracterització de la tecnologia de sensors.

Aquestes estructures es dissenyen per una còmoda caracterització en oblia, fet que ens permet obtenir una cartografia o distribució dels resultats per tota la oblia. En aquest apartat detallem els resultats obtinguts per aquests paràmetres per tal d'estudiar la repetibilitat i el control de la tecnologia de fabricació de sensors.

		$R_{\#Pz}$ [ $\Omega/\square$ ]	$W_{Pz}$ ( $\mu m$ )	$R_{c\_Al}$ ( $\Omega$ )
RUN 1880	Oblia 1	$113.9 \pm 0.7$	$5.51 \pm 0.04$	$9.3 \pm 0.8$
	Oblia 2	$115.4 \pm 0.9$	$5.65 \pm 0.06$	$7.4 \pm 1.8$
RUN 2096	Oblia 1	$116.0 \pm 0.8$	$6.68 \pm 0.19$	$7.5 \pm 0.8$
	Oblia 2	$116.6 \pm 0.5$	$6.20 \pm 0.05$	$8.0 \pm 0.3$

Taula 5.1: Paràmetres obtinguts de la cartografia dels xips de test per diferents oblies i pels diferents runs.

A la Taula 5.1 es mostren els valors promigs i la desviació estàndard dels paràmetres estudiats per les oblies 1 i 2 dels runs 1880 i 2096. L'anàlisi estadístic efectuat a les dades ha estat del tipus K-sigma. Els resultats obtinguts per a la resistència quadre de les piezoresistències, ( $R\#Pz$ ), és més alt que l'esperat per les dades de la implantació, de  $100\Omega/\square$ , però en tots els casos la dispersió no supera l'1%. Aquest valor de desviació és molt positiu doncs, ajudarà a reduir el *mismatching* entre les piezoresistències del pont. S'ha de dir però que només s'han mesurat 12 xips, ja que el xip de test només es va col·locar a la fila central de la oblia CNM149, tal i com es pot veure a l'annex C. El valor de l'ample de pista de les piezoresistències és un 13% més gran que el dibuixat en màscara en el cas de la oblia 2 del run 1880 i del 33% pel cas de la oblia 1 del run 2096, aquests valors són usals en el cas de resistències per implantació on sempre es produeix una certa difusió lateral. Una resistència quadre més gran que el previst, ens farà augmentar el valor de les piezoresistències dissenyades, mentre que una amplada més gran el fa disminuir. Aquest fet es comprova en els valors promigs de les piezoresistències *rosette* implementades al marc dels sensors d'acceleració (veure Taula 5.2). Es donen els valors per les piezoresistències longitudinals i transversals per les *rosettes* R1 i R2.

		RL1 [ $\Omega$ ]	RT1 [ $\Omega$ ]	RL2 [ $\Omega$ ]	RT2 [ $\Omega$ ]
RUN 1880	Oblia 1	1713 $\pm$ 48	1705 $\pm$ 44	1700 $\pm$ 49	1701 $\pm$ 50
	Oblia 2	1718 $\pm$ 30	1712 $\pm$ 28	1694 $\pm$ 53	1697 $\pm$ 51
RUN 2096	Oblia 1	1463 $\pm$ 47	1460 $\pm$ 47	1460 $\pm$ 43	1468 $\pm$ 43
	Oblia 2	1424 $\pm$ 44	1421 $\pm$ 44	1418 $\pm$ 41	1424 $\pm$ 40

**Taula 5.2:** Resultats de la mesura en oblia de les estructures *rosette* dels acceleròmetres.

Els valors promigs de la taula 5.2 són sobre tots els xips de la oblia CNM149. Aquestes piezoresistències estaven dissenyades en màscara per un valor de  $1600\Omega$ . En el cas del run 1880 el valor més alt que l'esperat de la resistència quadre ha provocat que obtinguéssim un augment en el valor promig de les piezoresistències. Pel run 2096, en canvi, l'ample de pista, ens ha perjudicat i ha fet disminuir el valor de les piezoresistències. Els valors de dispersió són molt bons, doncs, no superen el 3.5%. Així i tot, aquest valor és massa alt perquè nosaltres puguem treballar amb valors promigs. En aquests dispositius els valors esperats d'esforços mecànics són d'ordre d'1MPa. Per aquests valors la variació relativa de les piezoresistències és de l'ordre de 1 per mil tal i com s'extreu de la expressió (5.1). Aquesta expressió és la A.16 de l'Annex A, en la qual s'han substituït els valors dels coeficients piezoresistius i es multiplica pel coeficient corrector del dopatge emprat en la nostra tecnologia.

$$\frac{\Delta R}{R} = 0.7(71.8 \cdot \sigma_l - 66.3 \cdot \sigma_t) \cdot 10^{-11} \quad (5.1)$$

Així doncs, per poder analitzar els efectes de l'encapsulat haurem de treballar amb els valors de les piezoresistències una a una i no podrem treballar amb valors promigs. Una altra conseqüència que s'extreu de la expressió (5.1) és la mínima resolució d'estrès que ens permet la mesura de les piezoresistències. Aquesta mesura es realitza amb un error de  $\pm 1\Omega$ .

Aquest error es correspon a un valor de  $\pm 5\text{MPa}$ , per tant, només podrem tenir en compte valors d'esforços superior a això.

## 5.2 Caracterització del procés d'encapsulat.

Per poder avaluar els efectes de les diferents etapes d'encapsulat del sensor s'han de mesurar les estructures de test, incloses al xip de test i als acceleròmetres, abans i després de cada etapa d'encapsulat. Concretament, volem estudiar la etapa de soldadura anòdica i el muntatge *flip-chip*. Per a estudiar la soldadura anòdica farem mesures sobre la oblia de sensors ja soldada i a continuació sobre els mateixos xips un cop tallats i sense muntar enlloc perquè no hi pugui haver influència de cap encapsulat. Per analitzar els efectes del muntatge *flip-chip*, aquests mateixos xips mesurats individualment es mesuraran un cop estiguin muntats en format MCM. La mesura es realitzarà sempre amb contacte Kelvin, per poder excloure possibles resistències afegides per l'encapsulat. La feina de la mesura dels xips de test és una feina feixuga, doncs, únicament el primer pas es pot dur a terme sobre la oblia.

### 5.2.1 Mesures del xip de test.

Com vam veure al capítol 3, el disseny del xip de test inclou un total de quatre *rosettes* situades als ponts centrals del dispositiu. A aquests elements els hem anomenat **R1-R4** (veure Figura 5.2) i dins de cada element les resistències situades al llarg de la direcció longitudinal s'anomenaran **R<sub>l</sub>** i les disposades transversalment **R<sub>t</sub>**.

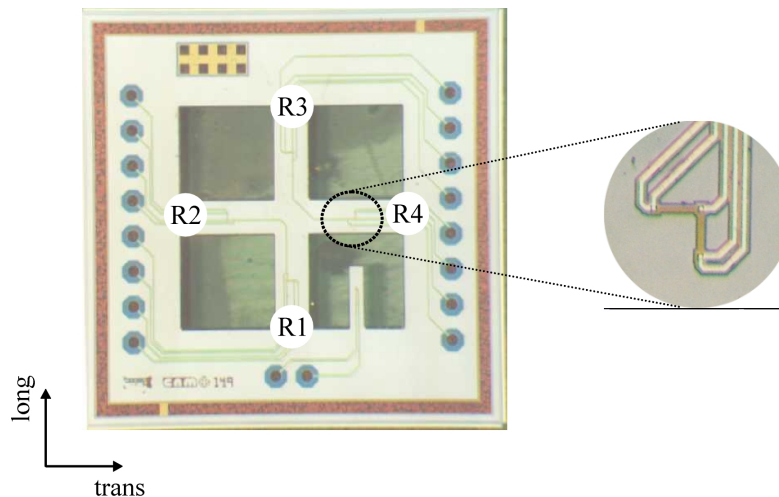


Figura 5.2: Distribució dels elements de test sobre el xip de test.

La direcció que hem anomenat longitudinal és la corresponent a la direcció [110] i la transversal és la  $[\bar{1}10]$ . Segons aquesta convenció la variació d'una *rosette*, en la nostra tecnologia, ve donada per la expressió (5.2) desenvolupada a l'apartat 3.3.1:

$$\frac{\Delta R_l}{R_l} - \frac{\Delta R_t}{R_t} = 48.3 \cdot 10^{-11} (\sigma_l - \sigma_t) \quad (5.2)$$

Recordem que nosaltres només podem mesurar amb precisió la diferència d'esforços mecànics,  $(\sigma_l - \sigma_t)$ , doncs és l'únic paràmetre que és independent de la temperatura.

A l'apartat 3.3 s'han donat els resultats per a la simulació del xip de test sota una deformació constant. Els estressos només es donen al llarg de la direcció en que s'ha produït la deformació i, per tant, només els trobem al llarg del pont que està disposat en aquesta direcció. Es a dir, si tenim una compressió en la direcció longitudinal, els estressos només seran importants en aquesta direcció i per tant només es detectaran al llarg del pont longitudinal. En el pont transversal no es detectarà res i no hi haurà variació de la *rosette*. En canvi si, com és d'esperar, tenim una compressió al llarg dels dos eixos a la vegada, en el pont longitudinal seran importants els estressos longitudinal,  $\sigma_l$ , mentre que al pont transversal ho seran els  $\sigma_t$ . Per tant, si com hem fet nosaltres, mantenim la mateixa convenció de direccions per totes les *rosettes*, llavors una deformació forçada d'igual valor en ambdós eixos es notarà com una disminució de la *rosette* disposada al llarg de l'eix longitudinal i un increment d'igual valor per la *rosette* situada en el pont perpendicular.

#### □ Resultats per la soldadura anòdica

Ja hem explicat extensament el procés de la soldadura anòdica en d'altres apartats. En aquest punt només volem fer un càlcul de quin seria l'ordre de magnitud esperat de l'estrès provocat per aquest procés. La compressió forçada que pateix el silici depèn de la diferència de coeficients d'expansió tèrmica ( $\alpha$ ) entre els dos materials en contacte i ve donat per la expressió següent:

$$\Delta l = (\alpha_{Py} - \alpha_{Si}) \cdot (T_{sol} - T_{amb}) \cdot l \quad (5.3)$$

on  $l$  és la mida del xip, en el nostre cas 5.5mm i  $T_{sol}$  és la temperatura a la que es produeix la soldadura. En aquesta expressió no s'ha tingut en compte la dependència amb la temperatura dels coeficients d'expansió. La temperatura a la que es realitza la soldadura és a 400°C, i segons la expressió 5.3 la diferència en la contracció dels dos materials,  $\Delta l$ , és d'aproximadament 1µm. Aquesta és la contracció que es dona al punt de soldadura entre el silici i el Pyrex, però aquest valor no es trasllada completament a la superfície del silici doncs el silici té un mòdul de Young ( $E_Y = 169\text{GPa}$ ) més gran que el Pyrex ( $E_Y = 66\text{GPa}$ ). De tota manera farem els càlculs amb  $\Delta l = 1\mu\text{m}$  per analitzar el pitjor dels casos possibles. A l'apartat de simulacions del xip de test es donava que el valor d'esforços mecànics al ponts centrals per una compressió de 10nm era de 0.5MPa. Considerant que el comportament del silici sigui lineal, podem extrapolar els resultats per una compressió de 1µm i obtenim un nivell d'esforços al voltant de 50MPa. Insistim en que aquest valor només és un valor indicatiu i que representa el valor màxim d'esforç que pot arribar a patir el silici.

A la Taula 5.3 es mostren els resultats del càlcul de la diferència d'estressos, segons la relació (5.2), per les *rosettes* dels xip de test de la oblia 2096-1. Els resultats que es troben per sota els 5MPa no són significatius doncs es troben dins l'error de mesura de les piezoresistències.

Oblia 2096-1	$\sigma_1 - \sigma_t$ (R1) [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_t$ (R2) [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_t$ (R3) [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_t$ (R4) [MPa]
A	0.75	-4.2	2.0	-4.8
C	-7.9	1.1	-8.9	0.6
D	-7.3	2.2	-7.8	5.2
E	-3.9	3.4	-7.0	4.9
F	-6.3	4.1	-7.2	6.2
G	-5.6	3.9	-6.8	7.9
H	-5.2	6.2	-8.4	8.0
I	-7.9	5.1	-8.7	3.6
K	-8.5	-1.4	-6.6	-0.4
M	-11	-1.1	-7.2	-1.8

**Taula 5.3: Resultats de la mesura per les rosettes del xip de test per la identificació d'estressos provinents del procés de soldadura anòdica.**

La columna de xips està ordenada segons la posició dels xips a la oblia, de manera que el primer i l'últim xips de la columna són els xips dels extrems de la oblia. Veiem que els xips del centre de la columna i, per tant del centre de la oblia, són els que presenten la resposta esperada a partir de les simulacions. Els resultats que, en cap cas no superen els 9MPa, són iguals però de signe contrari per *rosettes* situades en ponts ortogonals. Aquest resultat però es perd en els xips dels extrems de la oblia.

Recordem que aquestes mesures s'han realitzat comparant els resultats dels xips individuals dels xips en oblia, per tant la situació d'estrès que hi havia en la oblia sencera desapareix un cop els xips s'individualitzen.

□ **Resultats pel muntatge MCM.**

Per a la mesura del xip de test un cop muntat en format MCM, aquest es va muntar sobre una base PLCC44 i es va realitzar la soldadura amb fil corresponent. Les mesures de les *rosettes* del xip de test després del muntatge MCM no van donar cap resultat significatiu. Aquest fet ja l'havíem extret de les simulacions FEM del procés de soldadura (veure apartat 3.4) doncs els esforços mecànics són de caràcter molt local i disminueixen ràpidament des de el marc de soldadura. En la posició de les piezoresistències del xip de test, els estressos són ja indetectables.

5.2.2 *Mesures de les rosettes dels acceleròmetres*

Les anteriors etapes de mesura també es van dur a terme sobre les *rosettes* muntades al marc dels acceleròmetres per analitzar els efectes de l'encapsulat directament sobre els sensors. A la vegada que es mesuraven les rosettes dels sensors, es va realitzar una cartografia que mirava únicament la funcionalitat dels ponts de *Wheatstone* implementats. La cartografia en oblia és imprescindible per decidir quins son els xips bons o els *Known Good*

Dies (KGD) doncs, tal i com s'explica al capítol 2, el rendiment dels MCM depèn fortament d'aquesta dada.

□ **Resultats per la soldadura anòdica**

Els resultats per les dues primeres etapes, corresponents a la mesura de l'estrès derivat de la soldadura anòdica, no els donarem doncs van resultar negatius, tal i com esperàvem. Això és degut a que la situació de les piezoresistències en el marc dels sensors sobre una capa gruixuda de silici no és l'adequada per a la mesura d'aquests esforços. Aquest fet, ratifica la soldadura anòdica com un procés adequat pel muntatge de MEMS.

□ **Resultats pel muntatge MCM.**

Els resultats de la mesura de les *rosettes* es mostra a la Taula 5.4. Hem donat els valors de la diferència de les piezoresistències entre la mesura dels xips individualment i la mesura en el muntatge *flip-chip*. Com hem comentat abans l'error en la mesura és de  $\pm 1\Omega$ . També donem els valors de la diferència d'estressos obtingudes segons aquests valors per les rosettes R1 i R2 dels xips uniaxial i triaxials. La posició d'aquestes *rosettes* al marc dels sensors es pot veure a la Figura 5.3. Dins de cada tipus, uniaxial o triaxial, la situació de les *rosettes* és la mateixa per tots tres dissenys.

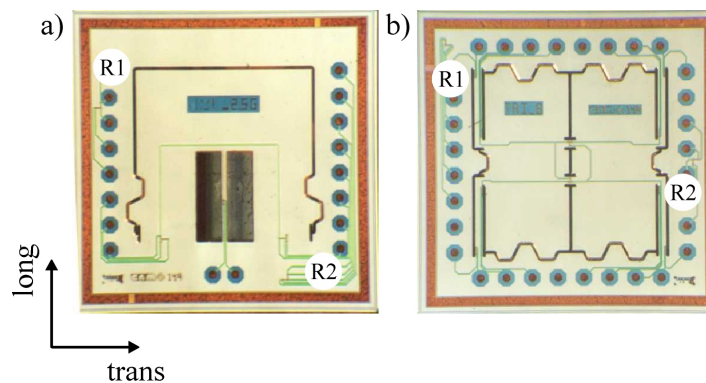


Figura 5.3: Posició dels elements rosette als dissenys a) uniaxial, b) triaxial.

		$\Delta RL1$ [ $\Omega$ ]	$\Delta RT1$ [ $\Omega$ ]	$\Delta RL2$ [ $\Omega$ ]	$\Delta RT2$ [ $\Omega$ ]	$\sigma_l - \sigma_t$ (R1) [MPa]	$\sigma_l - \sigma_t$ (R2) [MPa]
<b>Uniaxial</b>	<b>Xip 1</b>	3.9	-3			9.9	
	<b>Xip 2</b>	5	-4	-1	0	13	-1.4
	<b>Xip 3</b>	4.2	-4	-2.1	0.3	12	-3.4
	<b>Xip 4</b>	2.6	-4.2	-2	0	9.9	-2.9
	<b>Xip 5</b>	3.3	-7	-2.5	0	15	-3.6
<b>Triaxial</b>	<b>Xip 6</b>	-2.5	-3.7	-0.9	-5.1	1.7	5.8
	<b>Xip 7</b>	-2	-5	-2.6	-5.7	4	4.3
	<b>Xip 8</b>	-3.2	-5.2	-3.3	-3.3	2.7	0.1

Taula 5.4: Resultats de la mesura de les rosettes dels xips unaxials i triaxials.

Els resultats pels dissenys triaxials mostren que els valors d'esforços obtinguts són menyspreables doncs estan molt per sota de l'error de mesura,  $\pm 5\text{MPa}$ . Això ja ho havíem

previst en les simulacions del procés de soldadura, on veiem que encara que els valors d'esforços eren importants tenien el mateix signe, i degut a que nosaltres només podem mesurar la diferència no els podem detectar. Es fa notar, però, que s'ha obtingut una variació significativa del valor de les piezoresistències. Aquesta variació ha estat del mateix signe per a totes elles, fet que pot indicar una diferència de temperatura entre les dues etapes de mesura.

El cas dels acceleròmetres uniaxials és més interessant. S'observa una diferència entre els resultats per la *rosette* R1 i la R2. Per R1, tenim que les variacions de les resistències no són iguals i, en alguns casos, són fàcilment mesurables. Aquests valors, un cop anul·lada la dependència amb la temperatura, corresponen a valors d'esforços importants que arriben fins a 13MPa. En el cas de la *rosette* R2, el seu comportament és similar a les dels dissenys triaxial. Si ens fixem en la posició de les *rosettes* al xip uniaxial, (veure Figura 5.3), veiem que la *rosette* que està donant variació és la situada en un cantonada a prop dels *bump pads*. Aquest fet per sí sol no és significatiu, doncs també tenim *rosettes* situades a les cantonades en el disseny triaxial que no han donat resposta. La raó l'hem d'anar a trobar una vegada més, en la disposició asimètrica dels *bump pads*. Un valor de  $(\sigma_l - \sigma_t)$  positiu pot venir donat per dues raons: la existència d'un valor de tensió (positiu) al llarg de la direcció longitudinal o un valor de compressió (negatiu) al llarg de la transversal. En tot cas, un valor supera a l'altre de manera important. A l'apartat 4.3.5 hem vist que la disposició asimètrica dels pads provocava la inclinació del xip i, en alguns casos, el complet aixecament del xip. Després d'analitzar un MCM desmuntat vam poder veure com, en la regió on està situada la *rosette* R1, les boles de soldadura s'estenen molt per fora del pad i adopten una forma allargada. Aquest fet, podria provocar uns valors d'estrès més importants que els previstos a les simulacions, i són els que estariem mesurant.

### 5.3 Caracterització estàtica dels acceleròmetres.

En una caracterització estàtica es situa el sensor en unes condicions de mesura conegudes i es realitza la mesura de la magnitud de sortida. Per a la caracterització dels acceleròmetres es necessita d'un sistema que apliqui diferents valors d'acceleració al transductor. Això s'aconsegueix amb una roda giratòria, que faci rotar el dispositiu en el camp gravitatori. D'aquesta manera la component d'acceleració que "veu" el dispositiu en l'eix d'estudi, varia amb l'angle de rotació. La roda de la que disposàvem permetia rotacions de 10 graus i per tant es poden fer fins a 36 mesures dins el rang de  $\pm 1g$ . La representació dels resultats de la mesura en funció de l'acceleració aplicada rep el nom de *corba de calibració*. A continuació definirem els paràmetres de funcionament estàtic que s'extreuen de la caracterització d'un sensor i que són bàsics per descriure i avaluar el seu comportament.

*Sensibilitat:* Relació entre el canvi del senyal de sortida i el canvi del paràmetre a mesurar. S'obté del pendent de la corba de calibració.

*Offset:* Valor de la tensió de sortida amb entrada nul·la.

*Full Scale Output (FSO):* Diferència entre els dos valors de sortida pels punts extrems del rang de funcionament del sensor.



- Histèresi:** Valor màxim de la diferència en el senyal de sortida quan la mesura es realitza des del valor inferior del rang fins al superior i torna a l'inferior. Es sol expressar en %FSO.
- Repetibilitat:** Capacitat del sensor de reproduir els valors de sortida quan a l'entrada hi ha el mateix, sota les mateixes condicions i en el mateix sentit. Es sol expressar en %FSO.
- No-linealitat:** Desviació màxima de la corba de calibració del senyal de sortida del sensor a una línia recta. Es sol expressar en %FSO.
- Sensibilitat creuada:** Sensibilitat del sensor a l'efecte d'acceleracions perpendiculars a la direcció d'estudi.

Com ja hem dit, l'element sensor del transductor és un pont de *Wheatstone*. El sistema de mesura més senzill és l'aplicació d'una tensió en dos extrems del pont i la mesura de la caiguda de tensió a l'altre extrem. La tensió d'alimentació ( $V_{DD}$ ) emprada en aquest estudi ha estat de 5V. Així doncs, el muntatge de mesura utilitzat per la caracterització estàtica ha estat el següent:

- Roda giratòria
- Multímetre HP 34401A
- Font d'alimentació HP 6612C

### 5.3.1 Resultats per l'encapsulat en TO-8.

L'encapsulat en TO-8 ha estat històricament un dels més emprats per l'encapsulat de sensors. La seva mida permet encabir-hi la majoria de dissenys i la càpsula metàl·lica amb la que es tanca el conjunt no afecta al comportament dels sensors. El xip es munta sobre la base d'encapsulat i s'enganxa amb epoxy de baix estrès, posteriorment es realitza la soldadura amb fil cap als pins del TO-8. La Figura 5.4.a) és una fotografia d'un acceleròmetre uniaxial muntat sobre una base TO-8.

#### □ Resultats pels acceleròmetres uniaxials.

Pels acceleròmetres uniaxials, la convenció per les direccions emprades tant en el procés de simulació com en el de mesura és la que es mostra a la Figura 5.4.b):

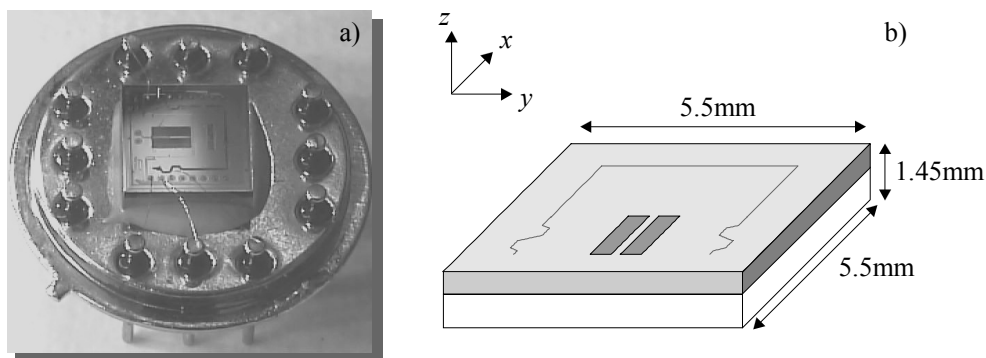
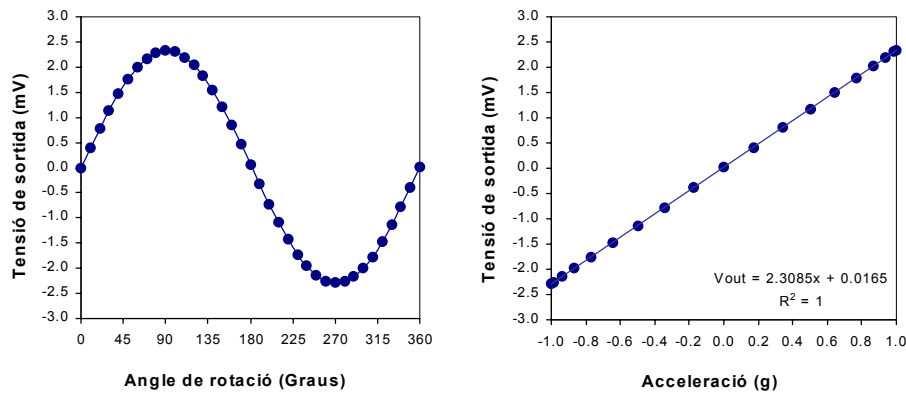


Figura 5.4: a) Fotografia d'un sensor uniaxial encapsulat en TO-8 i b) esquema de la convenció de direccions utilitzada durant la caracterització.

La Figura 5.5 mostra la tensió de sortida del sensor en funció de l'angle de rotació aplicat i la corba de calibració obtinguda pel acceleròmetre D2U-2.5g. De la corba de calibració s'extreu la sensibilitat del dispositiu. S'observa la bona linealitat del comportament del sensor dintre d'aquest rang.



**Figura 5.5: Resultats de la mesura estàtica pel disseny D2U-2.5g. Es mostra la tensió de sortida enfront l'angle de rotació i la corba de calibració ( $V_{DD}=5V$ ).**

Els paràmetres resultants de la caracterització estàtica per cadascun dels tres dissenys d'acceleròmetres uniaxials es recullen a la Taula 5.5.

<i>Paràmetre / Tipus</i>		<b>D2U-2.5g</b>	<b>D2U-1.5g</b>	<b>D2U-10g</b>
Impedància d'entrada	[KΩ]	1.888	2.251	2.278
Impedància de sortida	[KΩ]	1.882	2.257	2.286
Offset	[mV/V]	5.10	1.58	2.47
Sensibilitat	[mV/(V·g)]	0.46	0.55	1.21
No-Linealitat	[%FSO]	0.37	0.40	0.62
Histèresis	[%FSO]	0.12	0.45	0.09
Repetibilitat	[%FSO]	0.14	0.45	0.12
Sens. creuada eix x	[%]	6.93	8.53	8.27
Sens. creuada eix y	[%]	1.30	2.40	1.57

**Taula 5.5: Paràmetres extrets de la caracterització estàtica realitzada als acceleròmetres tipus uniaxials encapsulats en TO-8.**

De la Taula 5.5 volem ressaltar els baixos nivells d'offset pels tres tipus de dispositius. Això és indicatiu de la bona definició de les piezoresistències, i dels baixos nivells d'estressos intrínsecs que presenten els transductors d'aquesta tecnologia. Si ens fixem en els paràmetres que descriuen el comportament de la resposta com són la linealitat, la histèresi, la repetibilitat, trobem que tots estan per sota de l'1% donant compte del bon comportament dels sensors en el rang d'estudi de  $\pm 1g$ . Els valors de la sensibilitat creuada són sempre més importants en la direcció x que en la direcció y, tal i com es va comentar a l'apartat 3.2.2. Els

valors de la impedància d'entrada i de sortida són diferents pel disseny D2U-2.5g, perquè corresponen a un altre run, concretament a la oblia 1 del run 2096.

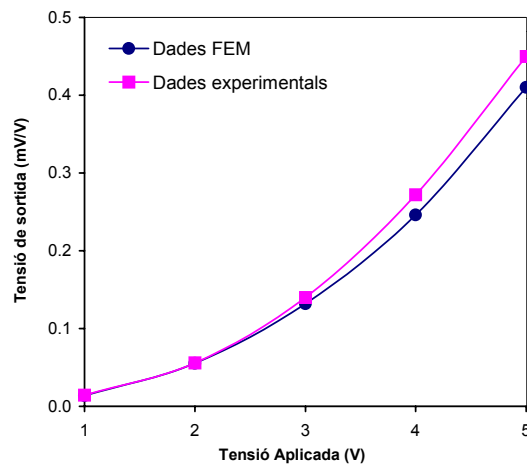
Un dels motius per a la caracterització dels components en TO-8 era el poder comprovar que els paràmetres obtinguts experimentalment es corresponen amb els proporcionats durant l'estudi per elements finits a l'etapa de disseny. A la Taula 5.6 es realitza una comparativa entre els valors obtinguts mitjançant simulació FEM i els obtinguts experimentalment.

	Paràmetre		FEM	Mesurat
D2U-2.5g	Sensibilitat en z	[mV/V·g]	0.43	0.46
	Sens. creuada amb x	[%]	10.2	6.93
	Sens. creuada amb y	[%]	1.81	1.30
D2U-1.5g	Sensibilitat en z	[mV/V·g]	0.56	0.55
	Sens. creuada amb x	[%]	9.3	8.53
	Sens. creuada amb y	[%]	3.4	2.40
D2U-10g	Sensibilitat en z	[mV/V·g]	1.03	1.21
	Sens. creuada amb x	[%]	8.15	8.27
	Sens. creuada amb y	[%]	1.7	1.57

**Taula 5.6: Taula comparativa dels resultats de simulació respecte els mesurats en encapsulat TO-8.**

S'extreu de la Taula 5.6 la bona concordància dels valors mesurats per a la sensibilitat en l'eix z amb els predits per la simulació FEM. El mateix succeeix amb les sensibilitats creuades on es dona una bona coincidència dels valors i, en general, més baixos que els esperats, tret del cas de sensibilitat en l'eix x pel disseny D2U-2.5g, on el valor és molt més baix del predit.

La resposta del sistema d'autotest també va ser estudiada. Al capítol 3, es va explicar que el valor i la posició de la resistència calefactora s'havia optimitzat per tal d'obtenir a la sortida un valor de sensibilitat equivalent a 1g. Només es fa notar que per quan funciona el sistema d'autotest s'anul·la l'efecte de l'acció de la gravetat. Això permet fer la mesura sense tenir en consideració la posició del sensor. La Figura 5.6 mostra la tensió de sortida del pont de *Wheatstone* en funció de la tensió aplicada a la resistència calefactora, pel disseny D2U-2.5g.

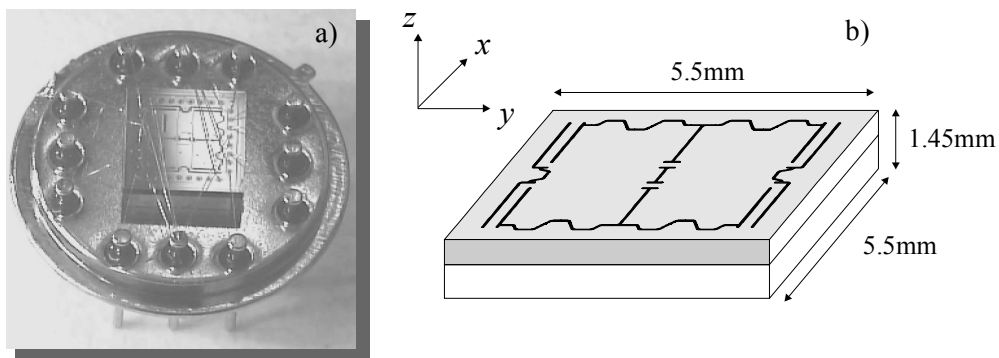


**Figura 5.6:** Tensió de sortida del sensor quan apliquem una tensió d'alimentació a la resistència calefactora.

Les diferències entre els resultats experimentals i els de simulació són molt petites a valors baixos de potència dissipada i es van fent més grans amb l'increment de la tensió a la resistència calefactora fins arribar a una diferència del 10% per una tensió d'alimentació de 5V. Les dades experimentals són sempre superiors a les simulades, però això guarda relació amb el fet que la sensibilitat estàtica també hagi estat més gran que la esperada pel disseny D2U-2.5g.

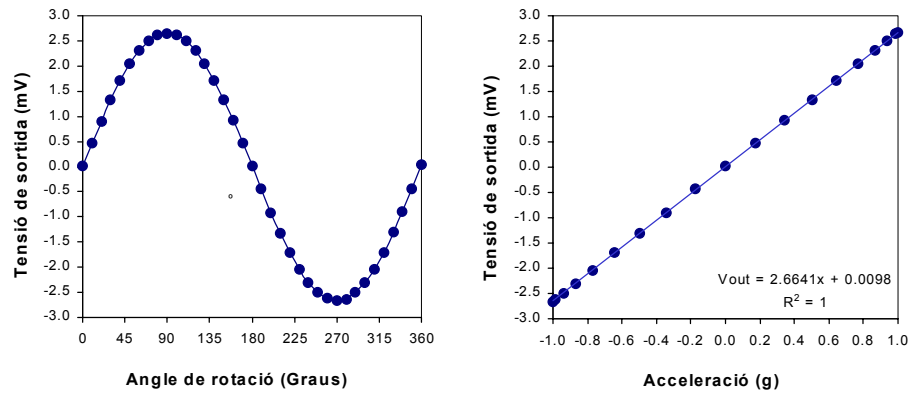
□ **Resultats pels acceleròmetres tipus triaxials.**

La convenció de direccions emprades en aquest tipus de dispositius, és la que es mostra a la Figura 5.7.b).

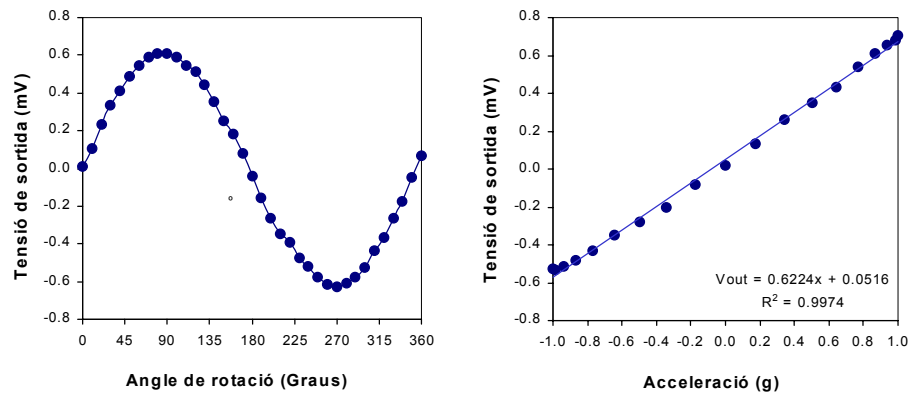


**Figura 5.7:** Fotografia d'un sensor triaxial encapsulat en TO-8 i esquema de la convenció de direccions utilitzada durant la caracterització.

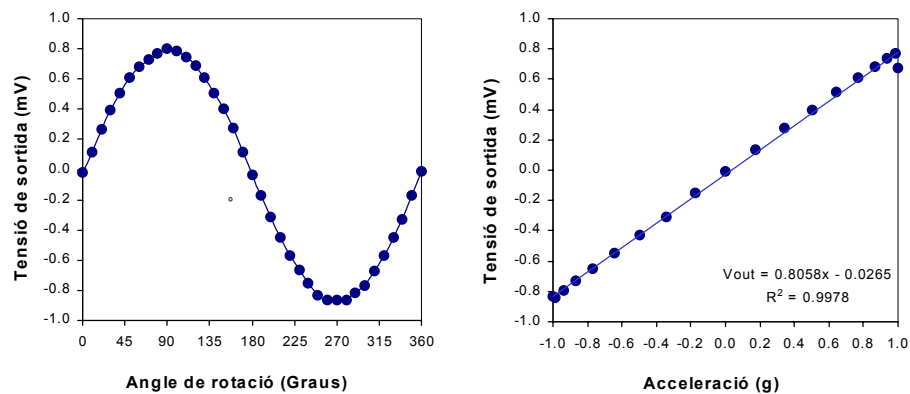
Als acceleròmetres triaxials se'ls va realitzar una caracterització exhaustiva tant a l'eix z com en els eixos x e y. Els resultats pel disseny Triaxial-8res es mostren a les Figures 5.8, 5.9 i 5.10.



**Figura 5.8:** Resultats de la mesura estàtica pel disseny Tri-8res en la direcció z. Es mostra la tensió de sortida enfront l'angle de rotació i la corba de calibració ( $V_{DD}=5V$ ).



**Figura 5.9:** Resultats de la mesura estàtica pel disseny Tri-8res en la direcció x. Es mostra la tensió de sortida enfront l'angle de rotació i la corba de calibració ( $V_{DD}=5V$ ).



**Figura 5.10:** Resultats de la mesura estàtica pel disseny Tri-8res en la direcció y. Es mostra la tensió de sortida enfront l'angle de rotació i la corba de calibració ( $V_{DD}=5V$ ).

La Taula 5.7 recopila els paràmetres extrets de la caracterització estàtica per cadascuna de les tres direccions de l'acceleració pel disseny Triaxial.

Paràmetre		Disseny Triaxial		
		z	x	y
Impedància d'entrada	[KΩ]	2.05	1.57	1.57
Impedància de sortida	[KΩ]	2.06	2.43	2.43
Offset	[mV/V]	0.94	2.42	8.65
Sensibilitat	[mV/(V·g)]	0.566	0.142	0.085
No-Linealitat	[%FSO]	0.67	2.49	3.01
Histèresi	[%FSO]	0.44	1.79	6.46
Repetibilitat	[%FSO]	0.51	0.87	6.46
Sens. Creuada eix x, z	[%]	-	5.63	2.99
Sens. Creuada eix y, x	[%]	-	2.81	1.19

**Taula 5.7: Paràmetres extrets de la caracterització estàtica realitzada al disseny triaxial.**

Com s'extreu de la Taula 5.7 el comportament més bo, quant a no-linealitat, histèresi i repetibilitat es dona per la resposta en la direcció z amb valors per sota l'1%. Pels eixos x i y, mesurats amb les piezoresistències situades als ponts laterals, la resposta és més deficient amb valors de no-linealitat, en alguns casos, molt per sobre de l'1%. Les sensibilitats creuades, tal i com vàrem comentar al capítol 3, són més grans en la direcció z que en l'altre direcció en el pla (x,y). Els valors d'offset pels ponts laterals, en canvi segueixen mantenint-se amb valors baixos.

Paràmetre		Disseny Triaxial-opt		
		Z	x	y
Impedància d'entrada	[KΩ]	2.13	1.40	1.40
Impedància de sortida	[KΩ]	2.22	2.52	2.52
Offset	[mV/V]	0.45	0.82	3.6
Sensibilitat	[mV/(V·g)]	0.523	0.070	0.042
No-Linealitat	[%FSO]	0.76	4.23	1.14
Histèresis	[%FSO]	0.13	1.68	4.67
Repetibilitat	[%FSO]	0.29	1.77	3.94
Sens. Creuada eix x, z	[%]	2.48	12.83	3.54
Sens. Creuada eix y, x	[%]	3.06	7.13	7.07

**Taula 5.8: Paràmetres extrets de la caracterització estàtica realitzada al disseny triaxial optimitzat.**

En el cas del triaxial optimitzat, veiem que no s'ha aconseguit la fita que ens havíem marcat de reduir el valor de les sensibilitats creuades. Això és degut a la baixa sensibilitat del pont de *Wheatstone* en la direcció x i y i a la dificultat en la mesura. Per a aquest disseny, el

soroll de mesura ( $10\mu\text{V}$ ) ja es correspon a aproximadament un 4-8% del valor de fons d'escala del sensor. Si bé hem fet disminuir el valor de la tensió d'offset, la qual està relacionada amb el nivell d'estressos inicials del xip, però també amb la baixa sensibilitat d'aquests.

Paràmetre		Disseny Triaxial-8res		
		z	x	y
Impedància d'entrada	[K $\Omega$ ]	2.11	2.05	1.44
Impedància de sortida	[K $\Omega$ ]	2.35	2.12	2.31
Offset	[mV/V]	0.26	2.9	6.78
Sensibilitat	[mV/(V·g)]	0.533	0.124	0.161
Linealitat	[%FSO]	0.37	3.37	6.87
Histeresis	[%FSO]	0.34	2.53	2.78
Repetibilitat	[%FSO]	0.37	4.29	5.01
Sens. Creuada eix x, z	[%]	0.19	8.9	0.66
Sens. Creuada eix y, x	[%]	0.19	6.47	6.62

**Taula 5.9: Paràmetres extrets de la caracterització estàtica realitzada al disseny triaxial-8res.**

El disseny Triaxial-8res recupera els valors que havíem obtingut pel disseny Triaxial en la direcció z, doncs físicament són idèntics. Recordem que en aquest disseny s'implementava un pont per separat per cadascuna de les acceleracions en el pla. Es fa notar l'important increment de la sensibilitat en la direcció y ( $0.161\text{mV}/\text{V}\cdot\text{g}$ ) que gairebé dobla el valor que presenta en el disseny Triaxial ( $0.085\text{mV}/\text{V}\cdot\text{g}$ ). S'observa també com la sensibilitat creuada en l'eix z, també és més baixa en el cas del disseny Triaxial-8res, doncs les piezoresistències per la detecció en la direcció y estan situades en una zona on el nivell d'esforços sota acceleració z, és més baix que en el cas del disseny Triaxial (veure apartat 3.2.3).

Sensibilitat [mV/V·g]	FEM			Mesurat TO-8		
	z	x	y	z	x	y
<b>Triaxial</b>	0.959	0.169	0.101	0.566	0.142	0.085
<b>Triaxial-opt</b>	0.917	0.095	0.069	0.523	0.070	0.042
<b>Triaxial-8res</b>	0.959	0.169	0.124	0.533	0.124	0.161

**Taula 5.10: Recull dels resultats per les simulacions FEM i per la mesura estàtica dels acceleròmetres triaxials encapsulats en TO-8, per les direccions z, x e y.**

Si reprenem del capítol 3 els resultats per les simulacions FEM de cadascun dels dissenys triaxials i els comparem amb els obtinguts experimentalment, (veure Taula 5.10), podem comprovar que, les sensibilitats són inferiors a les esperades, el que ens fa pensar que la estructura és més rígida. És espectacular la reducció de la sensibilitat per la direcció z.

### 5.3.2 Resultats per l'encapsulat MCM.

Els tipus d'estudis efectuats sobre els acceleròmetres encapsulats en TO-8 també es van dur a terme sobre els mòduls multichip per avaluar un possible impacte de l'encapsulat sobre la comportament del sensor. En aquest cas els MCM's es van muntar sobre bases PLCC44 degut a les grans dimensions del mòdul de 8.5mm de costat i de 1.5mm d'alçada. Les convencions dels eixos es van mantenir com en el cas del TO-8.

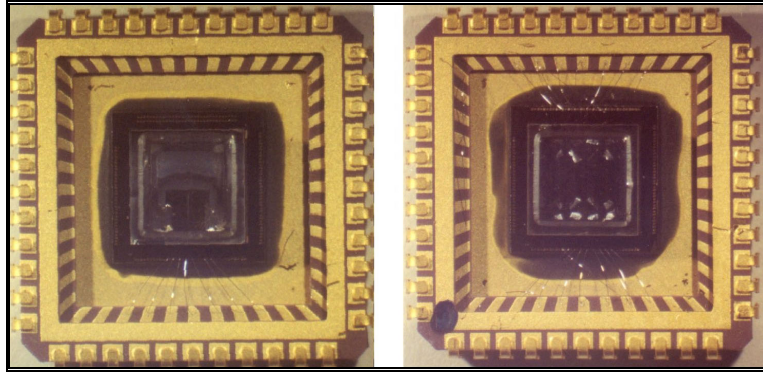


Figura 5.11: MCM's encapsulats en PLCC44 per la seva caracterització elèctrica.

#### □ Resultats pels acceleròmetres uniaxials.

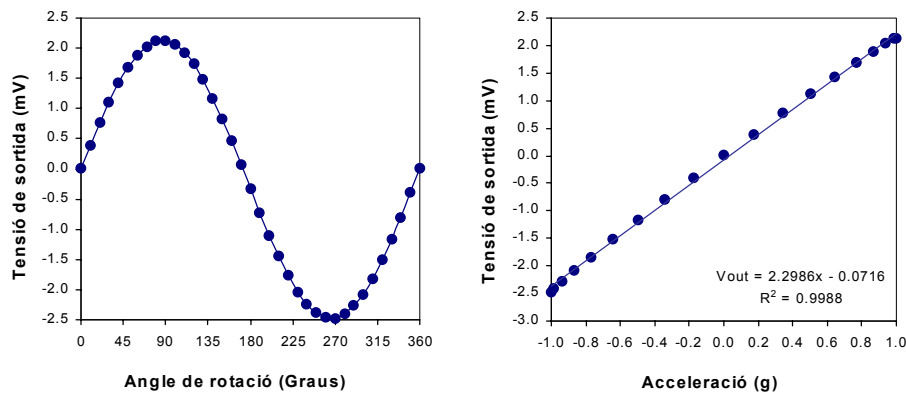


Figura 5.12: Resultats de la mesura estàtica pel disseny D2U-2.5g encapsulat en format MCM. Es mostra la tensió de sortida enfront l'angle de rotació i la corba de calibració ( $V_{DD}=5V$ ).



Paràmetre / Tipus		D2U-2.5g	D2U-1.5g	D2U-10g
Impedància d'entrada	[KΩ]	1.938	1.890	1.877
Impedància de sortida	[KΩ]	1.970	1.910	1.873
Offset	[mV/V]	1.85	2.23	1.59
Sensibilitat	[mV/(V·g)]	0.46	0.63	1.14
No-linealitat	[%FSO]	2.38	0.49	2.37
Histèresi	[%FSO]	0.28	0.35	0.05
Repetibilitat	[%FSO]	0.28	0.38	0.58
Sens. creuada amb l'eix x	[%]	7.16	5.74	6.98
Sens. creuada amb l'eix y	[%]	2.23	1.64	0.26

**Taula 5.11: Paràmetres extrets de la caracterització estàtica realitzada als acceleròmetres tipus uniaxials encapsulats en MCM.**

Si comparem la Taula 5.11 amb la Taula 5.5 on es recollien els resultats pels sensors uniaxial discrets, es pot veure com els dos paràmetres més indicatius de la presència o no d'estrès en les estructures, la tensió d'offset i la sensibilitat del dispositiu, no presenten cap variació significativa respecte els mateixos components encapsulats en TO-8. Aquest fet ens indica que els nivells d'estressos obtinguts en la simulació del procés de soldadura (veure apartat 3.4) no són suficients per modificar la resposta del sensor. S'observa en línies generals un empitjorament del comportament de la linealitat de la resposta, la qual es pot relacionar també amb els valors de sensibilitat creuada, que s'han vist lleugerament modificats, tant respecte els valors de simulació com respecte les mesures en TO-8. Això es podria atribuir a una inclinació en el muntatge dels dispositius D2U. Recordem que en el capítol 4 es mostrava la disposició asimètrica dels pads de soldadura que feia que el pes del xip es distribuís asimètricament, provocant una certa inclinació d'aquest, la qual es podria sumar a la del muntatge en PLCC44. Es fa notar que una inclinació de només 1° ja fa variar la sortida un 0.9%FSO, en el cas dels uniaxials.

#### □ Resultats pels acceleròmetres triaxials.

Les figures 5.13, 5.14 i 5.15 són els resultats per la caracterització en format MCM de acceleròmetre Triaxial-8res.

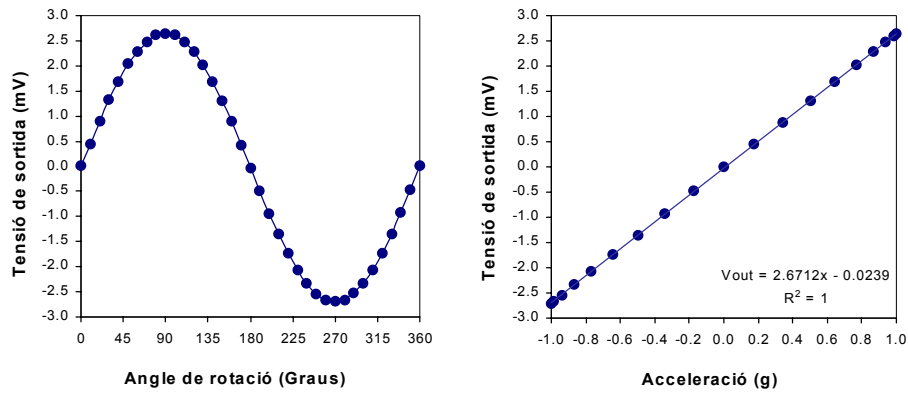


Figura 5.13: Resultats de la mesura estàtica pel disseny MCM-Triaxial-8res en la direcció z. Es mostra la sortida enfront l'angle de rotació i la corba de calibració ( $V_{DD}=5V$ ).

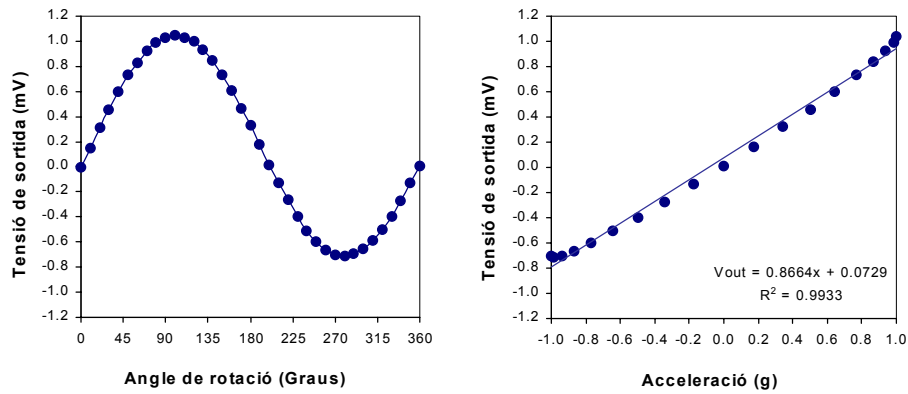


Figura 5.14: Resultats de la mesura estàtica pel disseny MCM-Triaxial-8res en la direcció x. Es mostra la sortida enfront l'angle de rotació i la corba de calibració ( $V_{DD}=5V$ ).

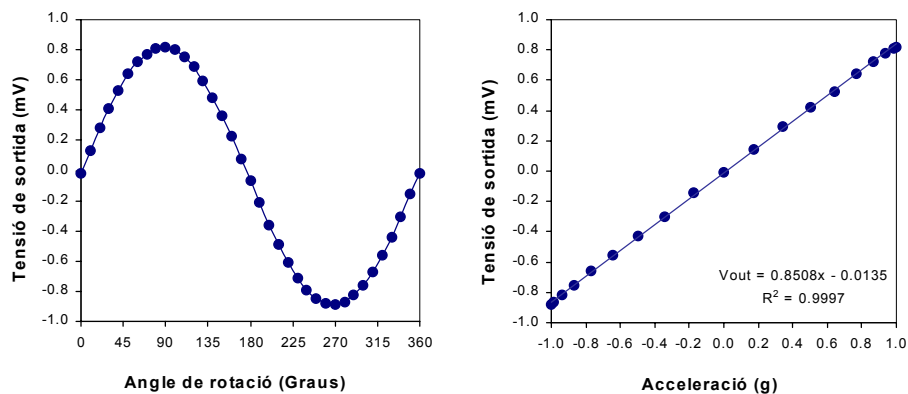


Figura 5.15: Resultats de la mesura estàtica pel disseny MCM-Triaxial-8res en la direcció y. Es mostra la sortida enfront l'angle de rotació i la corba de calibració ( $V_{DD}=5V$ ).

Les taules 5.12, 5.13 i 5.14 són el resultat de la caracterització estàtica pels acceleròmetres triaxials muntats en format multiplex.

Paràmetre		MCM-Triaxial		
		z	x	y
Impedància d'entrada	[KΩ]	1.93	1.43	1.43
Impedància de sortida	[KΩ]	1.96	2.56	2.56
Offset	[mV/V]	1.46	3.96	7.56
Sensibilitat	[mV/(V·g)]	0.595	0.162	0.10
No-Linealitat	[%FSO]	4.89	19.7	1.44
Histèresi	[%FSO]	6.86	1.38	0.97
Repetibilitat	[%FSO]	6.83	1.85	1.6
Sens. Creuada eix x, z	[%]	1.22	6.14	5.01
Sens. Creuada eix y, x	[%]	0.69	2.03	1.0

**Taula 5.12: Paràmetres extrets de la caracterització estàtica realitzada als acceleròmetres tipus Triaxial encapsulats en MCM.**

Paràmetre		MCM-Triaxial-opt		
		z	x	y
Impedància d'entrada	[KΩ]	2.21	1.58	1.58
Impedància de sortida	[KΩ]	2.21	2.64	2.64
Offset	[mV/V]	3.67	5.40	8.87
Sensibilitat	[mV/(V·g)]	0.519	0.075	0.048
No-Linealitat	[%FSO]	0.44	1.90	1.05
Histèresi	[%FSO]	0.35	1.69	1.45
Repetibilitat	[%FSO]	0.78	1.76	2.05
Sens. Creuada eix x, z	[%]	0.77	5.33	6.28
Sens. Creuada eix y, x	[%]	-	4.72	6.12

**Taula 5.13: Paràmetres extrets de la caracterització estàtica realitzada als acceleròmetres tipus Triaxial optimitzat encapsulats en MCM.**

Paràmetre		MCM-Triaxial-8res		
		z	x	y
Impedància d'entrada	[KΩ]	2.09	1.98	1.57
Impedància de sortida	[KΩ]	2.11	2.13	1.98
Offset	[mV/V]	1.81	0.32	0.73
Sensibilitat	[mV/(V·g)]	0.534	0.173	0.170
No-Linealitat	[%FSO]	0.41	5.46	1.11
Histèresi	[%FSO]	0.26	0.28	0.65
Repetibilitat	[%FSO]	0.28	0.62	0.63
Sens. Creuada eix x, z	[%]	0.37	18.45	2.93
Sens. Creuada eix y, x	[%]	0.56	5.32	7.27

**Taula 5.14: Paràmetres extrets de la caracterització estàtica realitzada als acceleròmetres tipus Triaxial-8res encapsulats en MCM.**

El resultat de la caracterització estàtica pels acceleròmetres encapsulats en format MCM mostra que no existeix cap variació significativa respecte els mateixos dispositius mesurats en TO-8. Això mostra que l'encapsulat multixip no afecta al comportament estàtic del dispositiu. En alguns casos els valors d'offset són més alts que pel mateix dispositiu encapsulat en TO-8. S'ha de dir que els valors de tensió d'offset són molt dependents del component mesurat i que una desviació del 2% del valor nominal de les piezoresistències, ja ens proporciona una tensió d'offset de 5mV/V.

## 5.4 Caracterització dinàmica

La caracterització dinàmica consisteix en posar el sensor sota l'acció d'una força o acceleració canviant en el temps. La forma més senzilla de fer-ho és l'aplicació d'una vibració sinusoidal de freqüència i amplitud controlables. Aquest tipus d'estudi permet sotmetre el sensor a valors d'acceleració superiors a 1g i per tant obtenir-ne la caracterització en tot el seu rang d'aplicació. El segon estudi que es pot obtenir de la caracterització dinàmica és l'anàlisi de la resposta del sensor a diferents freqüències del senyal aplicat. D'aquesta anàlisi s'extreuen paràmetres com la freqüència de ressonància del sistema massa-molla, l'ample de banda pel qual serà operatiu el sensor i el factor d'esmoreïment. A continuació detallarem breument la teoria que descriu el comportament del nostre sistema quan es sotmès a oscil·lacions forçades.

Suposem que el sistema massa-molla està sotmès a una força sinusoidal de freqüència  $\omega$  i amplitud  $F_0$ :

$$F = F_0 \sin \omega t \quad (5.4)$$

L'equació diferencial que governa el sistema massa-molla sotmès a una força com la descrita a l'expressió (5.1) és la que s'indica a continuació:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (5.5)$$

on  $m$  és la massa del dispositiu,  $k$  és la constant elàstica de la molla i  $c$  és la constant d'esmoreïment. Per a continuar amb els càlculs, resulta molt convenient utilitzar la relació  $a_0 = F_0/m$  de manera que la equació (5.2) es pot rescriure com:

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega_0^2 x = a_0 \sin \omega t \quad (5.6)$$

On  $\beta$  és el coeficient d'esmoreïment i  $\omega_0$  la freqüència natural d'oscil·lació del sistema tal i com es van definir al capítol 2. La solució d'aquesta equació consta de dues parts: la solució general de l'equació diferencial homogènia i una solució particular que tingui en compte la força impulsora. La solució general és la corresponent a un sistema massa-molla esmoreït (veure equació (2.5)) i per tant descriu una situació transitòria. La solució particular de l'equació (5.3) descriu el comportament del sistema un cop arribat a l'estat estacionari i té la forma:

$$x = A \sin(\omega t - \delta) \quad (5.7)$$

on  $A$  és l'amplitud i  $\delta$  el desfasament de la resposta respecte la força impulsora  $F$ . L'amplitud i el desfasament vénen definits per les expressions (5.5) i (5.6), respectivament:

$$A = \frac{a_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \quad (5.8)$$

$$\tan \delta = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (5.9)$$

A partir l'equació (5.4) es comprova que el sistema, en presència d'una oscil·lació forçada, vibra a la freqüència imposada però amb un desfasament que és funció de la freqüència natural de vibració  $\omega_0$  i de la freqüència imposada. Es fa notar que tant l'amplitud com el desfasament no depenen de les condicions inicials del sistema, les quals sí intervenen en l'etapa transitòria, sinó només de les característiques del sistema i del senyal sinusoidal aplicat. Per facilitar l'escriptura de les relacions anteriors definirem els següents paràmetres: el factor d'esmoreïment  $\zeta$ ,

$$\zeta = \frac{\beta}{\omega_0} \quad (5.10)$$

i l'amplitud estàtica  $A_0$ ,

$$A_0 = a_0 / \omega_0^2 \quad (5.11)$$

Fent ús d'aquestes relacions l'amplitud relativa  $A/A_0$  o guany del sistema es pot expressar com:

$$A_{rel} = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\omega^2 / \omega_0^2))^2 + 4\zeta^2 (\omega^2 / \omega_0^2)}} \quad (5.12)$$

De l'equació (5.9) s'extreu que l'amplitud de les oscil·lacions a l'estat estacionari és funció de la freqüència de la força impulsora i del factor d'escoriment. La Figura 5.16 representa l'expressió (5.9) per diferents valors del factor d'escoriment  $\zeta$ .

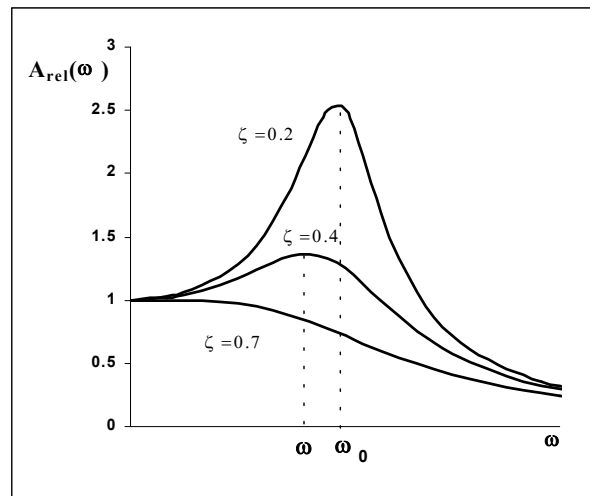


Figura 5.16: Representació de l'amplitud relativa en funció de la freqüència de la força impulsora, per diferents valors del factor d'escoriment.

A freqüències baixes, el sistema es comporta com en una situació estàtica i l'amplitud de les oscil·lacions és la imposada per les condicions de la força impulsora,  $A_0$ . A freqüències properes a la natural del sistema l'amplitud creix i arriba a un màxim que és més pronunciat per  $\zeta$  més petites. Observem que el pic màxim es desplaça cap a freqüències més baixes i disminueix en alçada conforme  $\zeta$  augmenta. El pic arriba a desaparèixer completament per un valor de  $\zeta=0.7$  anomenat **escoriment crític**. Per freqüències més altes que la freqüència de ressonància l'amplitud decreix molt ràpidament amb la freqüència de la força impulsora. El valor d'aquest màxim d'amplitud ve donat per l'expressió (5.10):

$$A_{rel}(max) = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (5.13)$$

I la freqüència a la que es dona aquest màxim és l'anomenada freqüència de ressonància  $\omega_{res}$  i té el valor:

$$\omega_{res} = \omega_0\sqrt{1-2\zeta^2} \quad (5.14)$$

Com hem dit a la introducció l'objectiu de la caracterització dinàmica és l'obtenció dels paràmetres que descriuen el seu comportament en dinàmic com l'ample de banda, així com de paràmetres més físics com el factor d'escoriment el qual dona informació sobre l'encapsulat del dispositiu. Així doncs les expressions (5.10) i (5.11) seran les més útils pel nostre estudi. De la mesura precisa de la freqüència de ressonància i a partir de les simulacions FEM de les quals obtenim la freqüència natural del sistema podem extreure el valor del factor d'escoriment. I a l'inrevés, del control del factor d'escoriment podem controlar el comportament del sistema. Sovint es dissenyen els sensors perquè estiguin en la situació d'escoriment crític que es troba al voltant de  $\zeta=0.7$ . Si no es pot treballar en el punt d'amortiment crític llavors és necessari conèixer el factor de qualitat  $Q$  del sistema que

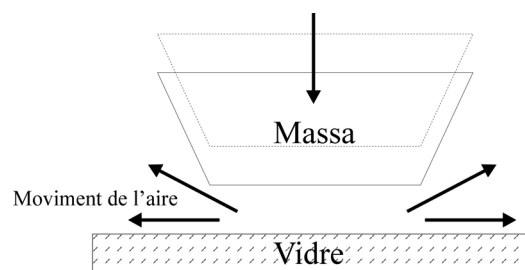
dóna informació sobre el pic de ressonància. Si definim  $Q$  com l'amplitud relativa a la freqüència de ressonància queda que el factor de qualitat és l'expressat a l'equació (5.10):

$$Q = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (5.15)$$

De l'expressió (5.12) i tenint en compte la definició del factor d'esmoreïment (equació (5.7)) s'observa que el factor de qualitat és directament proporcional a la freqüència natural del sistema, com més alta és aquesta més gran és el factor de qualitat. Un valor de  $Q$  gran és interessant en aplicacions com els ressonadors o els giròscops, però en una aplicació de baixa freqüència com la nostra pot ser desitjable treballar en la situació d'esmoreïment crític. En aquest punt ens assegurem una resposta lineal en tot l'ample de freqüències d'operació. Com hem dit, el factor de qualitat pot ser controlat a través de l'esmoreïment del dispositiu. En un oscil·lador de silici el mitjà de dissipació o la força d'esmoreïment més important prové de la fricció amb l'aire, doncs les estructures tenen poca massa i sovint estan situades en espais tancats. Així doncs, l'esmoreïment està relacionat amb el tipus d'encapsulat del component. En el nostre cas, el dispositiu es troba situat dins un encapsulat tancat amb parets molt a prop de la massa del dispositiu. Quan el sensor es mou a prop d'una superfície o paret fixa, l'esmoreïment es dona degut al desplaçament lateral de les masses d'aire quan la massa del sensor es mou cap a ella (veure Figura 5.17). Aquest tipus d'esmoreïment rep el nom d'esmoreïment per capa comprimida d'aire, el qual descrivim a continuació.

#### □ Esmoreïment per capa comprimida d'aire.

Quan la distància amb la paret fixa és petita en comparació amb les àrees en moviment, la compressió de la capa prima d'aire presenta una gran resistència al moviment i el desplaçament de l'aire consumeix energia degut a les forces internes de fricció. La força d'esmoreïment és dependent de la distància de separació amb la paret, quan més petita és aquesta distància més important és la força d'esmoreïment. Aquest fet s'utilitza molt sovint per controlar el factor d'esmoreïment de les microestructures.



**Figura 5.17: Principi de funcionament de l'amortiment per capa d'aire comprimit.**

Les equacions que descriuen l'esmoreïment per capa prima d'aire deriven de la mecànica de fluids, la teoria de la qual està descrita a la literatura [1]. A continuació mostrarem només les expressions que hem emprat pel càlcul de l'esmoreïment per capa comprimida d'aire.

Per a una massa rectangular amb una llargària  $L$  i una amplada  $B$ , que es mou en l'aire contra una paret situada a una distància  $h$ , el coeficient d'esmoreïment ve donat per:

$$c = \frac{\eta L B^3}{h^3} \psi \left( \frac{B}{L} \right) \quad (5.16)$$

on  $\eta$  és el coeficient de viscositat de l'aire i  $\psi(B/L)$  és una funció que depèn de la geometria de la massa rectangular i que pren els valors  $\psi=1$ , per  $L \gg B$ , i  $\psi=0.42$  per una superfície quadrada  $B=L$ . La Figura 5.18 és una gràfica de la dependència de la funció  $\psi$  amb la raó  $B/L$ .

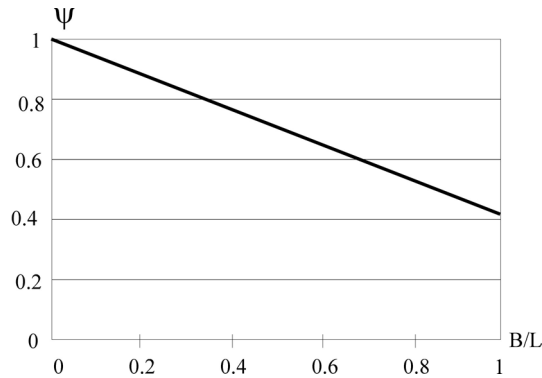


Figura 5.18: Representació de la funció  $\Psi$  respecte la raó  $B/L$ .

En el nostre cas la massa està confinada entre una paret de vidre i el substrat MCM. L'esmoreïment doncs, és la suma dels dos coeficients corresponents a l'esmoreïment pel vidre,  $c_v$ , i l'esmoreïment amb el substrat  $c_s$ . Pels càlculs d'aquest coeficients s'ha considerat la distància que separa la massa del substrat com l'alçada del marc tancat de soldadura, obtingut mitjançant fotografia SEM directament d'un mòdul encapsulat, (veure apartat 4.3), mentre que la distància amb el vidre, és la profunditat de la cavitat creada al vidre mitjançant el gravat previ a la soldadura. Les distàncies en cada cas són,  $h_s = 60\mu\text{m}$  i  $h_v = 80\mu\text{m}$ , respectivament. El càlcul del paràmetre  $c_v$  va demostrar que degut a que la separació amb el vidre és més gran i a que les superfícies inferiors (de cara al vidre) son més petites que les superiors (de cara al substrat) degut a la anisotropia del gravat, aquest coeficient era sempre inferior al paràmetre  $c_s$ , un, o en casos, dos ordres de magnitud més petit. La Taula 5.15. recull els valors emprats en el càlcul dels coeficients  $c$  i els valors obtinguts mitjançant la expressió (5.13), per a cadascun dels dissenys d'acceleròmetres. El paràmetre  $c$  és la suma dels dos coeficients  $c_v$  i  $c_s$ . També es mostren els paràmetres  $\zeta$  i  $Q$  derivats del coeficient d'esmoreïment i calculats segons les expressions (5.7) i (5.12), respectivament.

Tipus	Massa [mg]	$\omega$ [Hz]	$c \cdot 10^{-3}$ [1/s]	$\zeta$	$Q$
D2U-2.5g	4.96	720	0.68	0.015	32
D2U-1.5g	6.3	533	1.08	0.025	19.4
D2U-10g	7.15	326	2.9	0.10	5
Triaxial	6.1	674	1.0	0.02	25
Triaxial-opt	6.1	988	1.0	0.013	37
Triaxial-8res	6.1	674	1.0	0.02	25

Taula 5.15: Paràmetres relacionats amb el càlcul de l'esmoreïment per capa comprimida d'aire.

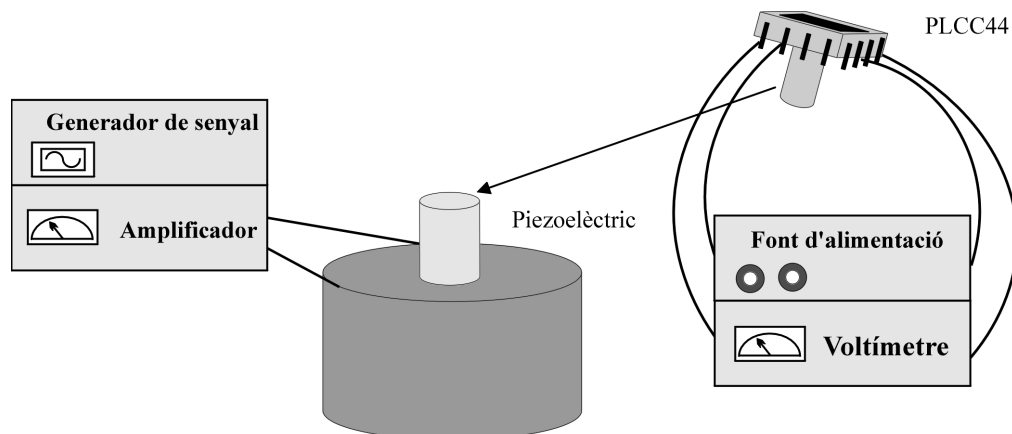


Per microresonadors en silici, la  $Q$  en aire sol ser de l'ordre de 100 o inclús més gran. De l'estudi de la Taula 5.15 es pot veure que tots els dispositius estan molt esmorteïts, en especial els que presenten més àrea com són el D2U-10g, i els triaxials. Degut a que el factor de qualitat depèn directament de la freqüència natural dels acceleròmetres els triaxials tenen un factor de qualitat més alt que l'uniaxial.

A continuació passem a descriure el muntatge realitzat per dur a terme les mesures en dinàmic dels acceleròmetres i donarem els resultats, tant pels dispositius encapsulats en TO-8 com pel muntatge MCM.

#### 5.4.1 Descripció del sistema de mesura en dinàmic.

El muntatge consisteix en fer servir un piezoelèctric per generar un força sinusoidal. El sensor d'acceleració es munta rígidament sobre el piezoelèctric per que les vibracions d'aquests es transmetin sòlidament al sensor. El piezoelèctric de referència un Bruel&Kjaer, es conduït per un generador de senyal i el seu moviment es controlat en llaç tancat. Així doncs, el piezoelèctric funcionarà com el generador de la vibració sinusoidal sobre el nostre sensor i a la vegada com a patró de referència per fer la lectura.



**Figura 5.19:** Il·lustració del muntatge utilitzat per la caracterització en dinàmic dels acceleròmetres

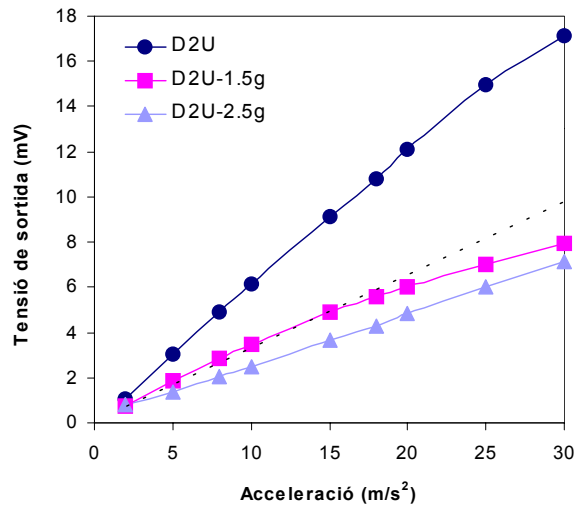
Tant l'encapsulat TO-8 com el PLCC44 es van muntar sobre uns cilindres d'alumini fabricats a l'efecte perquè es poguessin subjectar més fàcilment al piezoelèctric i sense destorbar els cables de connexió. Els aparells emprats en la mesura del senyal de sortida del sensor han estat els mateixos que en la caracterització estàtica, per tal de no introduir nous errors a la mesura. Aquestes mesures es van dur a terme al Centre de Metrologia del Laboratori General d'Assaigs i Investigacions (LGAI).

#### 5.4.2 Resultats per l'escombrat en acceleració.

Per a caracteritzar el sensor a acceleracions superior a 1g apliquem una oscil·lació d'una freqüència constant i anem variant l'amplitud d'aquesta per tal d'anar augmentant l'acceleració sobre el sensor. Aquestes dues magnituds estan relacionades entre sí segons l'expressió:

$$a_c = A \cdot 2\pi f \quad (5.17)$$

La freqüència de treball emprada va ser de 40Hz, per tal de situar-nos en la regió plana de la Figura 5.16. Els resultats d'aquest estudi va oferir resultats molt similars tant pels dispositius encapsulats en TO-8 com pels encapsulats en MCM. La Figura 5.20 presenta els resultats en escombrat d'acceleració pels tres dissenys uniaxials en format MCM.



**Figura 5.20: Resultats de la caracterització dinàmica pels dispositius uniaxials encapsulat MCM.**

El disseny D2U-10g, presenta una bona linealitat en tot el rang mesurat, mentre que els dissenys D2U-2.5g i D2U-1.5g arriba un moment en que la corba de resposta ja no creix linealment sinó que s'aplanen. En el cas del disseny D2U-1.5g això succeeix per sobre de aprox. 1.5g. a partir d'aquest punt. Això és degut a que el recorregut de la masses està limitat pels dispositius de protecció contra xocs i per tant la resposta no pot augmentar linealment. Així doncs el càlcul de les sensibilitats i la linealitat per aquests dissenys es centraran en el rang d'operació de cadascun d'ells. A la Taula 5.16, hem recollit els valors de les sensibilitats dinàmiques i els comparem amb els valors de sensibilitat estàtica mostrats als apartats anteriors. En el cas dels dissenys triaxials, només es mostren els resultats de la caracterització dinàmica en la direcció z, doncs el seu encapsulat no permetia muntar adequadament el sensor en les direccions del pla del xip.

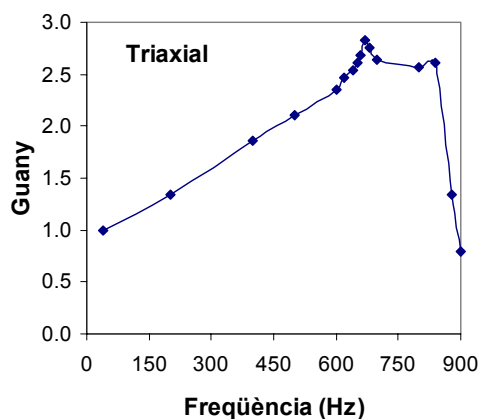
	D2U-2.5g	D2U-1.5g	D2U-10g	Triaxial	Tria-opt
<b>Sens estàtica</b>	0.46	0.63	1.14	0.56	0.52
<b>Sens. dinàmica</b>	0.45	0.63	1.14	0.50	0.52
<b>Linealitat dinàmica (%FSO)</b>	1.8	4.5	0.8	9.3	8.0

**Taula 5.16: Resultats de l'escombrat en acceleració fins a 30m/s² dels acceleròmetres en format MCM.**

S'observa com les sensibilitats en dinàmica s'ajusten molt bé als resultats obtinguts en estàtica.

### 5.4.3 Resultats per l'escombrat en freqüència.

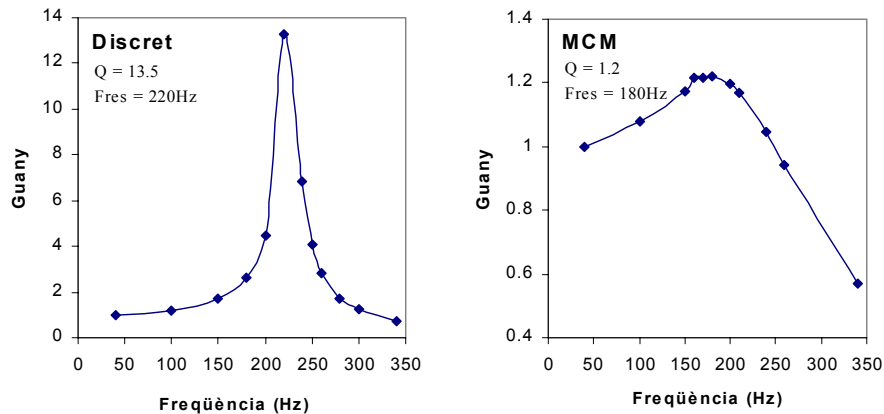
L'estudi d'escombrat en freqüència només s'ha pogut realitzar sobre el disseny sense estructures de protecció, el D2U-10g i la raó torna a ser la existència del sistema de protecció contra xocs. Els valors de Q obtinguts a la Taula 5.15, encara que baixos per un acceleròmetre a l'aire continuen essent alts per la nostra aplicació, i ens impedeixen fer la mesura de la freqüència de ressonància. Si recordem, aquest sistema limita el recorregut de les masses a un màxim de  $2\mu\text{m}$ , que en el cas del sensors D2U-2.5g i D2U-1.5g, corresponen a 2.5g i 1.5g, respectivament. En conseqüència, si es realitza la mesura a 1g, el màxim guany mesurable dels dispositius ha de ser, 2.5 i 1.5, respectivament. doncs a prop de la ressonància les estructures topen amb les limitacions físiques del moviment. Es pot veure que fins i tot treballant al límit de resolució que ens permetia l'equip de mesura, a  $2\text{m/s}^2$ , els màxims guanys mesurables serien de 12.5 i 7.5 respectivament, mentre que per aquests components en situació de ressonància poden tenir guanys de fins a 32 en el cas del disseny D2U-2.5g. Aquest fet es va poder constatar tal i com es veu a la Figura 5.21.



**Figura 5.21: Resultats de l'escombrat en freqüència pel disseny Triaxial a  $10\text{m/s}^2$**

Per aquest dispositiu la freqüència natural de ressonància es troba a 674Hz. S'observa la resposta plana de la sortida del sensor en la regió propera a la de ressonància amb un guany que no supera el 2.6, que és el màxim que els hi permet les estructures de protecció. Així doncs, la existència d'aquestes estructures també s'ha de tenir en compte en l'estudi dinàmic d'aquests sensors. Però com havíem ressaltat ja al capítol 1 d'aquesta memòria, les aplicacions pels quals estan dissenyats aquest components són aplicacions de fins a 50Hz.

Per tant, per tal de realitzar la completa caracterització del sistema en situació de ressonància, només ens podríem fer servir del disseny D2U-10g, el qual careix d'aquestes estructures de protecció i per tant no té limitacions en la ressonància. L'estudi exhaustiu d'aquest disseny però, ja ens pot donar molta informació sobre els efectes de l'encapsulat MCM. La Figura 5.22 mostra els resultats obtinguts pel dispositius D2U-10g, encapsulat en TO-8 i en MCM. La mesura es va realitzar en escombrat de freqüència amb una resolució en freqüència de 10 Hz i un valor d'acceleració de  $10\text{m/s}^2$ .



**Figura 5.22: Resultats de la caracterització en dinàmica pel disseny D2U-10g encapsulat en TO-8 i en MCM.**

Pel sensor encapsulat en TO-8 hem obtingut un màxim de guany de 13.5 a una freqüència de ressonància de 220Hz. Per aquest sensor s'esperava un valor de Q de 36 a 326Hz segons els valors obtinguts de la simulació FEM i de la Taula 5.15. Com es pot veure, els resultats experimentals no coincideixen amb els esperats. En la disminució de la freqüència de ressonància, hi poden influir dos factors: el primer és l'augment de la sensibilitat estàtica mesurat respecte la obtinguda per simulació FEM (veure Taula 5.6). Degut a que el producte sensibilitat per freqüència de ressonància s'ha de mantenir constant, un augment de la sensibilitat comporta una disminució d'aquesta freqüència, encara que aquest fet per si mateix no explica la totalitat de la baixada. En segon lloc, l'amortiment, encara que petit quan el sensor està encapsulat en TO-8, pot disminuir la freqüència tal i com indica la expressió (5.17). Quant al factor de qualitat mesurat, si referim els càlculs del factor d'esmoreïment prenent com a freqüència de ressonància els 220Hz mesurats experimentalment, llavors trobem que el factor de qualitat disminueix fins a 24, i per tant apropant-se més als valors mesurats.

Els resultats mesurats pel D2U-10g en format MCM donen una disminució de la freqüència de ressonància fins a 180Hz i amb un guany de 1.2. Aquest valor és més baix que el mostrat a la Taula 5.15, de 5, calculat a una freqüència de 326Hz. Si referim referent els càlculs prenem com a freqüència natural del sistema la obtinguda després de la mesura del component en TO-8, 220Hz, la Q resultant és de 3.2 només un factor 2.5 superior al mesurat. Aquest resultat confirma, doncs, la presència d'aquest sobre esmoreïment degut al substrat multixip. Aquest valor de Q de 1.2 es correspon segons la expressió (5.15) a un valor de factor d'esmoreïment de 0.45. Si substituïm aquest valor a l'expressió pel càlcul de la freqüència de ressonància (expressió (5.14)) obtenim un valor de freqüència de 163Hz, molt proper als 180Hz obtinguts experimentalment.

## 5.5 Conclusions

El disseny del xip de test, s'ha provat molt útil a l'hora de detectar els estressos termo-mecànics provinents de la soldadura anòdica de la oblia de silici amb una de vidre Pyrex. La mesura dels elements de test, rosettes, implementats en aquest xip ens han provat la existència de certs esforços. Aquests esforços però només són presents quan la oblia està

soldada, un cop els xips es tallen la tensió desapareix. Aquesta tensió no és important als sensors doncs les *rosettes* dissenyades al marc dels acceleròmetres no han presentat cap variació durant aquesta mateixa etapa. Una altra prova d'aquest fet és el baix valor de les tensions d'offset dels sensors mesurats individualment, amb valors promigs inferiors als 3mV/V.

Al contrari, el xip de test no ens ha servit per obtenir informació del procés de soldadura *flip-chip*. Aquest fet, ja el coneixíem a partir de les simulacions efectuades d'aquest procés. En el xip de test, les *rosettes* estaven situades molt lluny del marc de soldadura perquè el nivell d'esforços fos important i detectable per a elles. Així i tot, aquest fet és molt valorable, doncs ens ha permès descartar la presència d'estressos que no haguéssim tingut en compte i per tant validar les nostres simulacions.

La mesura de les *rosettes*, només ens proporciona el valor de la diferència entre els stressos longitudinals i transversals. Això és degut a que aquest paràmetre és l'únic que és independent de la temperatura de mesura, i per tant és l'únic paràmetre "fiable".

En canvi, sí que hem obtingut resultats de les *rosettes* situades als acceleròmetres uniaxials. En aquests dissenys, el disseny asimètric del marc de soldadura ha provocat una distribució inhomogènia del pes del xip, i en conseqüència dels stressos. Això s'ha pogut comprovar amb una *rosette* que està situada en un punt molt crític, en una cantonada del xip. La resta de les *rosettes* situades en àrees homogènies, no han detectat la presència d'estressos bé degut a que no hi eren presents, bé degut a que les tensions en les direccions longitudinal i transversal tenien el mateix valor, i per tant la seva diferència és nul·la. En cap cas, aquest stressos perjudiquen a les piezoresistències sensores col·locades als ponts dels acceleròmetres, doncs no s'ha mesurat cap variació en la seva resposta tant estàtica com dinàmica.

En general, el resultat de la mesura de les *rosettes* si bé no contradiu les simulacions efectuades del procés de refosa de la pasta de soldadura, tampoc no ens ajuda a validar-lo. Per a poder fer una mesura més quantitativa dels esforços deguts a aquest procés s'haurien d'implementar noves estructures *rosette* amb més piezoresistències orientades en els direccions diagonals per tal de poder extreure les components dels esforços per separat, o bé emprar tècniques de mesura d'esforços mitjançant tècniques micro-raman. Som conscients però de la dificultat d'aquestes mesures deguts al relativament baix nivell d'esforços esperats.

La caracterització exhaustiva dels acceleròmetres tant en encapsulat individual com en format MCM ens permet assegurar que el muntatge d'aquests dispositius sensibles als esforços mecànics sobre un mòdul multixip no afecta als paràmetres més importants del seu comportament, com poden ser la sensibilitat o la tensió d'offset. Com era d'esperar, el muntatge MCM afegeix un esmorteïment important a les estructures oscil·lants quan les conduïm en dinàmic. Aquest esmorteïment és molt interessant per aplicacions on els sensors treballen en DC. En qualsevol cas, les estructures de protecció implementades en la major part dels sensors influeixen decisivament el comportament en dinàmic d'aquests.

La bona correspondència entre els valors extrets de la caracterització elèctrica dels sensors i els resultats de les simulacions FEM realitzades durant l'etapa de disseny, ens permet constatar el bon control en la fabricació d'aquests dispositius. Així i tot, el disseny Triaxial optimitzat, dissenyat per a reduir el valor de sensibilitat creuada respecte l'eix z dels

ponts laterals, no ha donat els resultats esperats degut a que tenien una sensibilitat molt baixa i qualsevol estrès el detectaven com un offset molt important.

## 5.6 Referències.

- [1] M. H. Bao, (2000) *Capítol 3: Air Damping, A: Micro mechanical transducers: pressure sensors, accelerometers, and gyroscopes*. Amsterdam: Elsevier. (Handbook of Sensors and Actuators ; 8). ISBN 0-444-50558-X