



EXPEDIENTE	IMDEEA/2017/54 (INESCOP) / IMDEEA/2017/148 (AIDIMME)
ACRÓNIMO	MATRIBOT
PROGRAMA	Proyectos de I+D de carácter no económico realizados en cooperación con empresas
TÍTULO DEL PROYECTO	Robótica colaborativa aplicada a procesos de inyección-extracción de suelas para calzado

Entregable E5.1.

INFORME DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

ÍNDICE

1. Descripción del entregable	3
2. Trabajo realizado	3
2.1. La Garra.....	3
2.2. El Acoplamiento al Robot	6
3. Validación de los resultados y conclusiones.....	8
3.1. Categoría A.....	13
3.1.1. Modelo 1: Calzado plano caballero.....	13
3.1.2. Modelo 4: Calzado plano señora.....	13
3.2. Categoría B: Calzado plano con huella	13
3.2.1. Modelo 2 y 3: Calzado plano niño/caballero con huella.....	13
3.2.2. Modelos 5 y 6: Calzado plano señora con huella.....	14
3.3. Categoría C: Calzado señora con altura.....	14
3.3.1. Modelo 7 y 10: Calzado señora con cuña o tacón	14
3.4. Categoría D: Calzado señora con huella y altura	14
3.4.1. Modelo 8 y 9: Calzado señora con huella y altura	14
4. Conclusiones	15

1. Descripción del entregable

Este informe incluye la validación de los resultados obtenidos, tanto a partir de la evaluación de los distintos elementos mecánicos diseñados y su consiguiente evolución, como del conjunto garra + pinza + accionamiento + acoplamiento con los diferentes robots disponibles.

2. Trabajo realizado

Se han diseñado diversos elementos mecánicos para realizar las tareas de extracción de los pisos desde los moldes de inyección (para más detalle, ver '*E2.1- Documento del diseño de sistemas de agarre y extracción*'), que pueden subdividirse en tres bloques diferentes que han debido ser construidos y evaluados independientemente y en conjunto.

En todos los casos, se han diseñado dos versiones del elemento, una adecuada para su construcción mediante técnicas de fabricación aditiva, y otra para mecanizado convencional. En el primer caso se ha podido evaluar la adecuación de dimensiones y la optimización del ensamblado, permitiendo además los trabajos iniciales de determinación de puntos de agarre y generación de trayectorias y la evaluación de la viabilidad del conjunto en los espacios limitados impuestos por las propias máquinas de inyección.

2.1. La Garra

El diseño inicial de la garra viene impuesto por la diversidad de ahorros que pueden presentarse en los pisos. Tras el estudio previo recogido en el entregable '*E1.1- Documento de estado del arte y análisis de operaciones*', se establece que resulta imposible diseñar una única garra adecuada a todos los casos, si bien se constata que aparece una mayor incidencia de ahorros con forma rectangular, formando una cuadrícula que puede tener uno o varios ejes centrales:



Figura 1: Disposición de ahorros en cuadrícula

En estas condiciones, se centra el trabajo en el diseño y validación de una garra adecuada a esta disposición, ya que cubre un porcentaje elevado de casos posibles.

Por otra parte, se realiza el diseño adaptado a la pinza SCHUNCK JGP 80-1, ampliamente utilizada en aplicaciones robóticas, y cuyas dimensiones resultan adecuadas para el caso que nos ocupa.

El primer prototipo se construye por el método de modelado por deposición fundida (FDM), obteniendo juegos iniciales de garras en acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y ácido poliláctico (PLA), cuya función era la validación de las dimensiones de los dedos para asegurar el correcto posicionamiento en la zona definida de agarre.

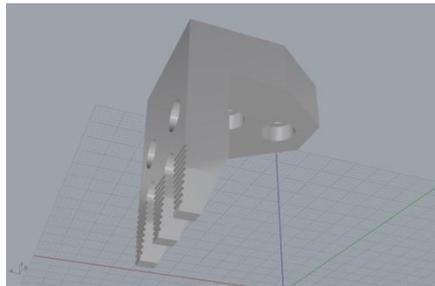


Figura 2: Diseño inicial de garra

Las pruebas iniciales se realizan acoplando la pinza directamente a la muñeca de los robots disponibles (ABB, COMAU, UR5) mediante los acoplamientos adecuados, y simulando las trayectorias de aproximación y agarre.



Figura 3: Pruebas iniciales de garras sobre distintos robots

Se evaluó también la validez de la garra para la extracción de la mazarota



Figura 4: Validación de garra para extracción de mazarota

Como consecuencia de todo ello, la garra ha sufrido una evolución en su diseño que se ha centrado mayoritariamente en los dedos: forma, tamaño y disposición relativa, para facilitar el acceso a la zona de agarre, y, especialmente, en la forma estriada de la parte de estos que agarra el piso, así como en el acoplamiento entre ellos, teniendo en cuenta los ángulos de desmoldeo, para garantizar una fuerza de sujeción adecuada.

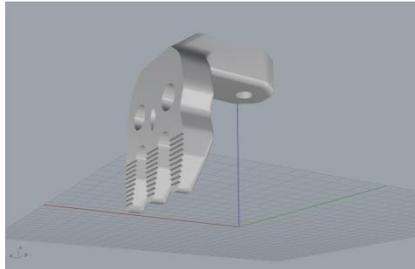


Figura 5: Diseño final de garra



Figura 6: Diversos diseños de garra construidos en ABS por fabricación aditiva (FDM)

A partir de este momento, se centralizaron las pruebas de validación con el robot UR5 disponible en las instalaciones de INESCOPE; se trata de un CoBot en torno al cual se ha construido el prototipo de celda robótica (ver entregable 'E4.1- Implementación de sistema de extracción')



Figura 7: Pruebas iniciales de pinza + garra

2.2. El Acoplamiento al Robot

Una vez definida la garra y la pinza de accionamiento, se diseñó un acoplamiento versátil válido para los tres robots disponibles, aunque la celda se montó con el CoBot UR5.

Precisamente a partir de las pruebas de validación de la garra, se constató que en ocasiones la fuerza necesaria para la extracción de pisos con huella profunda o tacón puede sobrepasar los límites de seguridad fijados para los robots colaborativos. Por ello, se diseñó el acoplamiento bajo dos premisas fundamentales:

- Que fuera válido para los robots disponibles: ABB, COMAU, UR5
- Que pudiera incorporar un cilindro neumático capaz de aportar la fuerza extra necesaria en algunas ocasiones.

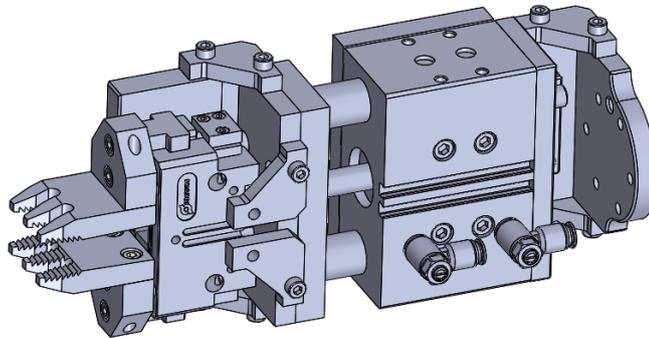


Figura 8: Diseño final del conjunto acoplamiento, cilindro neumático, pinza y garra

Las primeras pruebas se destinan a validar el diseño mecánico comprobando la adaptabilidad a los distintos robots propuestos. Como en el caso de la garra, se diseñan dos variantes de la pieza, una para mecanizado convencional y otra para construcción por técnicas de fabricación aditiva:

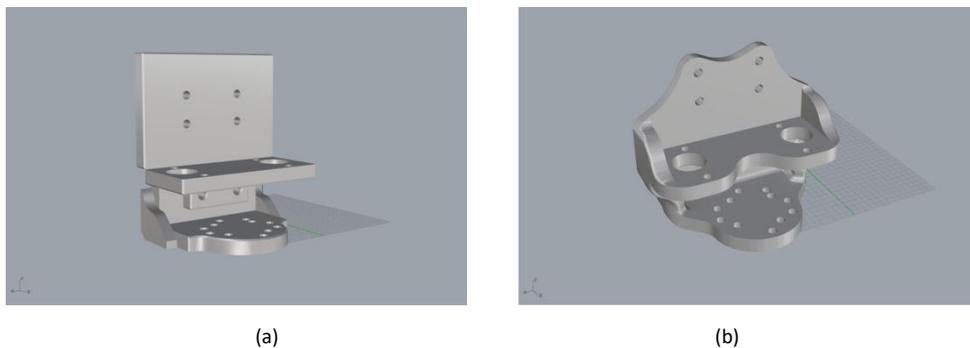
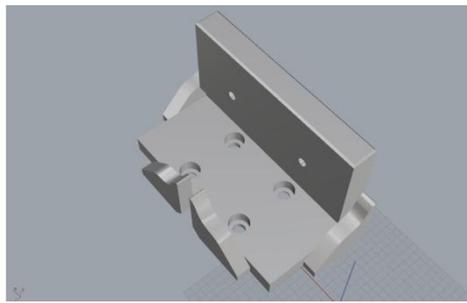
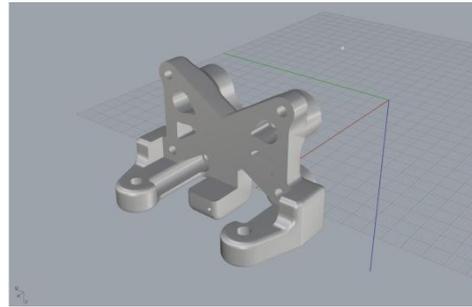


Figura 9: Diseño de acoplamiento multi-robot. (a) Diseño para mecanizado convencional, (b) Diseño para FDM



(a)



(b)

Figura 10: Diseño de acoplamiento pinza SCHUNCK. (a) Diseño para mecanizado convencional, (b) Diseño para FDM

Se construye un primer prototipo en ABS de cada una de las piezas diseñadas y se realiza la verificación de montaje:

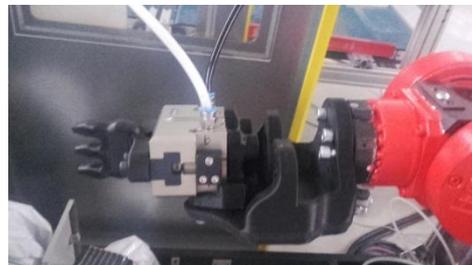


Figura 11: Montaje adaptador + pinza + garra sobre robot COMAU



Figura 12: Montaje adaptador + pinza + garra sobre robot ABB



Figura 13: Montaje adaptador + pinza + garra sobre CoBot UR5

Las características mecánicas de las piezas obtenidas no permiten la verificación funcional completa del sistema, sin embargo, el objetivo fue comprobar la viabilidad del montaje en todos los casos y definir las dimensiones de la herramienta atendiendo a las diferentes configuraciones posibles.

Como consecuencia, se modifican algunas cotas para facilitar las tareas de montaje, unificando la tornillería.

3. Validación de los resultados y conclusiones

Inicialmente, se ensaya el conjunto acoplamiento + pinza + garra en los tres robots disponibles, dadas sus diferentes características:

- ABB

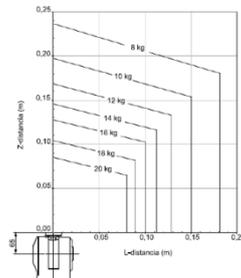


Figura 14: Curvas de carga robot ABB 2400/16

- COMAU

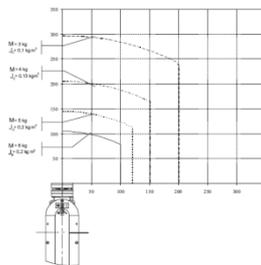


Figura 15: Curvas de carga robot COMAU SMART SIX

- UR5

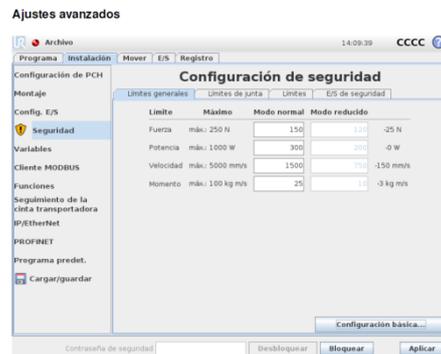
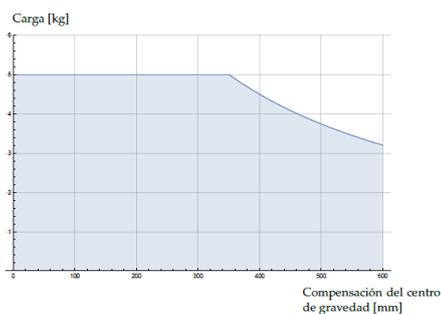


Figura 16: Curvas de carga y configuración de seguridad CoBot UR5

La fabricación posterior de las piezas por estereolitografía (SL) en resina (Somos® NeXt¹) con superiores características mecánicas, permitió ensayar casos reales de extracción sobre moldes inyectados con el objetivo de garantizar un agarre seguro en diversas situaciones y materiales. Como consecuencia de esta validación previa, el diseño de la garra sufrió diversas modificaciones del tipo de diente de garra y otras relacionadas con el montaje (ver entregable 'E2.1- Diseño de sistemas de agarre y extracción')



Figura 17: Garras y conjunto mordaza fabricadas en resina

Una vez validado el diseño constructivo de las diferentes piezas que componen el sistema de agarre, se fabrican las versiones finales:

- Por fabricación aditiva en Titanio (sinterizado láser)



Figura 18: Garras y conjunto mordaza fabricadas en titanio

- Por sistemas de mecanizado convencional



Figura 19: Garras en acero y conjunto mordazas mecanizadas en aluminio

¹ Características mecánicas

TECHNICAL DATA			
Mechanical Properties		Somos® NeXt Postcure	
ASTM Method	Property Description	Metric	Imperial
D638M	Tensile Modulus	2,370 - 2,490 MPa	343 - 361 ksi
D638M	Tensile Strength at Yield	41.1 - 43.3 MPa	5.9 - 6.3 ksi
D638M	Tensile Strength at Break	31.0 - 34.6 MPa	4.5 - 5.0 ksi
D638M	Elongation at Break	8 - 10%	8 - 10%
D638M	Elongation at Yield	3%	3%
D638M	Poisson's Ratio	0.42 - 0.44	0.42 - 0.44
D790M	Flexural Strength	67.8 - 70.8 MPa	9.8 - 10.3 ksi
D2240	Flexural Modulus	2,415 - 2,525 MPa	350 - 366 ksi
D256A	Izod Impact (Notched)	0.47 - 0.52 J/cm	0.88 - 0.97 ft-lb/in
D2240	Hardness (Shore D)	82	82
D570-98	Water Absorption	0.39 - 0.41%	0.39 - 0.41%

Se trata ya de piezas con requerimiento mecánico adecuado para realizar el trabajo real de extracción. Finalmente, se estableció un protocolo de trabajo para validación del sistema.

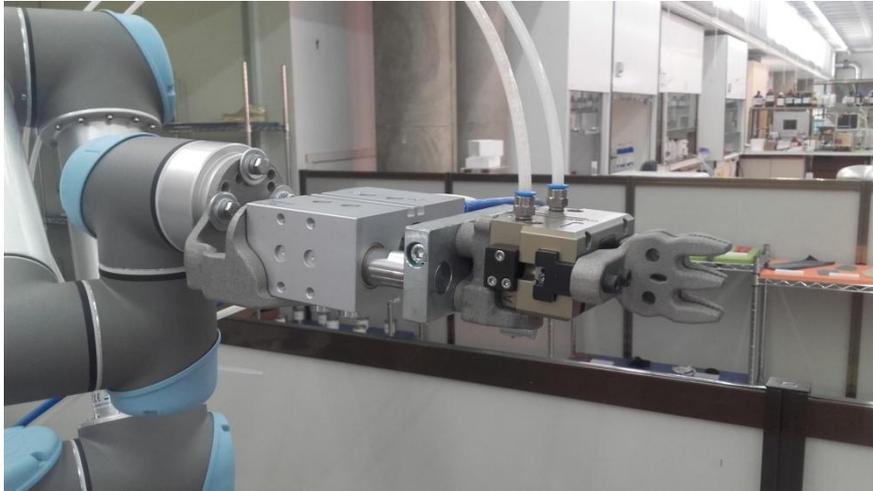


Figura 20: Conjunto de extracción en Titanio, montado sobre UR5

En un primer paso, se dividieron los moldes inyectados atendiendo a la clasificación previa de tipos de suelas (ver entregable '*E1.1 Estado del arte y análisis de operaciones*'), si bien se considera que los pisos de niño son asimilables a los de caballero, si obviamos las diferencias de tamaño.

Por otra parte, según estimaciones iniciales, la fuerza de extracción está íntimamente ligada con la profundidad de la huella del piso y, en su caso, con la existencia o no de tacón o cuña. Además, los pisos de señora con quiebre que no incluyen la zona del talón, se descartan por dificultades en el agarre. Con todo, la clasificación inicial queda reducida a:

- Caballero:
 - Vestir → Huella lisa o muy poco profunda
 - Casual / deportivo → Huella profunda/tacos
- Señora:
 - Vestir → Huella lisa o poco profunda, plano o con quiebre
 - Casual / deportivo → Huella profunda, plano o cuña

Para simplificar la tarea, se reagrupan estos tipos atendiendo más a la huella, quedando cuatro categorías básicas:

- Piso plano con huella poco profunda → A
- Piso plano con huella profunda/tacos → B
- Piso con cuña/tacón → C
- Piso con cuña/tacón con huella profunda → D

En el caso que nos ocupa, la importancia de esta clasificación radica esencialmente en la fuerza que será necesaria para realizar la extracción, y las implicaciones que ello tiene en cuanto a los requerimientos del robot y la necesidad de suplementarlo con un

actuador neumático. Así, a partir de los moldes inyectados aportados por nuestro proveedor, disponemos de:

Referencia ²	Descripción	Tallas	Categoría
Modelo 1	Calzado plano caballero	39-42	A
Modelo 2	Calzado plano niño c/huella	35-39	B
Modelo 3	Calzado plano caballero c/huella	39-42	B
Modelo 4	Calzado plano señora	35-41	A
Modelo 5	Calzado plano señora c/huella	35-42	B
Modelo 6	Calzado plano señora c/huella	36-42	B
Modelo 7	Calzado señora c/ cuña	36-40	C
Modelo 8	Calzado señora c/cuña, c/huella	35-42	D
Modelo 9	Calzado señora c/cuña, c/huella	36-41	D
Modelo 10	Calzado señora c/tacón	36-40	C

Tabla 1: Clasificación de los moldes para validación

Inicialmente, se realizan ensayos con moldes de las cuatro categorías en los tres robots disponibles, calculando previamente las trayectorias de forma manual para cada uno de ellos. En todos los casos, las trayectorias de aproximación y agarre resultan sencillas, pero se constata la dificultad para generar una trayectoria de extracción adecuada para cada caso, ya que se presenta muy dependiente del modelo con el que se trabaje, incluso dentro de una misma categoría.

En el caso de los robots ABB Y COMAU, instalados en la zona de maquinaria de INESCOP, se trabaja directamente con la pinza y la garra, sin incorporar el pistón, y se instala provisionalmente la estructura que soporta los moldes sobre la instalación previa de los robots, anclándola a sus bases de trabajo, con lo que presenta la rigidez adecuada. Se realizan ensayos de test con modelos pertenecientes a las cuatro categorías, testeando el agarre. Como consecuencia, evolucionan las garras para garantizar la correcta sujeción. Se realiza un test completo con ciclo completo para el Modelo 1, consiguiendo la extracción pero apareciendo roturas en la zona de agarre.

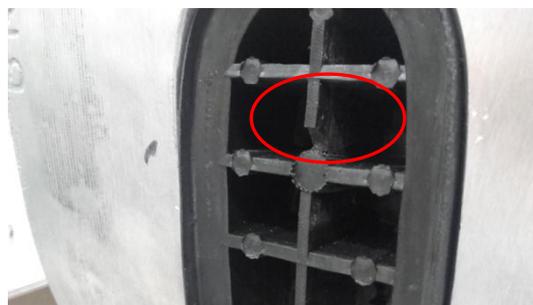


Figura 21: Detalle de rotura en la zona de agarre

A partir de este punto, para validar el cumplimiento de los objetivos técnicos propuestos, se trabaja con la celda robótica desarrollada, donde se encuentra el robot

² Por razones de confidencialidad/copyright, se ha establecido un sistema neutro de referencias y no se muestran imágenes de los modelos reales.

colaborativo UR5 (ver entregable 'E4.1- Implementación de sistema de extracción'), incorporando el dispositivo de extracción completo: brida + pistón neumático + pinza + garra (ver entregable 'E2.1-Diseño de sistemas de agarre y extracción de suelas')

Las primeras pruebas con el UR5, instalado en el Departamento de Robótica de INESCOP, demostraron la necesidad de diseñar y construir una estructura para mejorar la respuesta mecánica del sistema, al no existir entramado de anclaje al suelo (solicitud de cambios MATRIBOT de 28 de noviembre de 2017, aceptada según resolución del 14 de diciembre, con registro de salida del día 15 de diciembre, nº 04541)

Se recalcularon de nuevo las trayectorias manualmente, tanto para los dos pisos contenidos en cada molde como para la mazarota, atendiendo a la nueva situación de la herramienta y se realizó una simulación completa que sirvió de base para el trabajo con el generador de trayectorias.

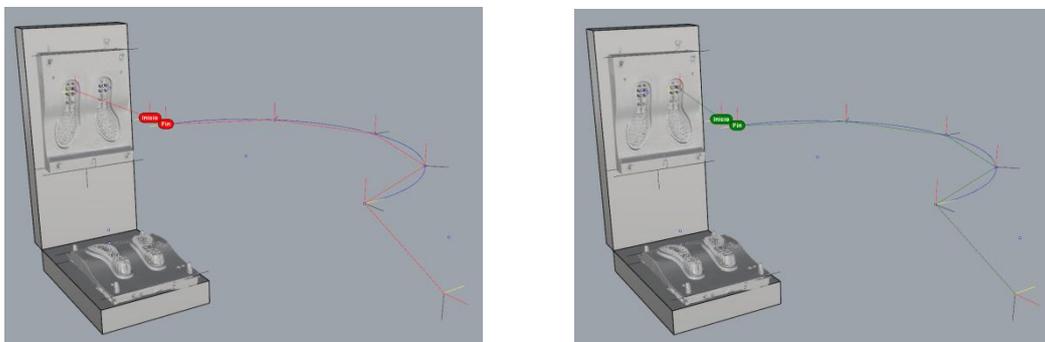


Figura 22: Trayectorias de extracción y depósito de pisos

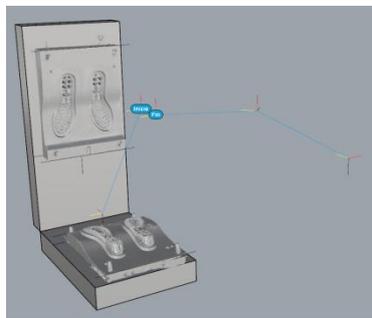


Figura 23: Trayectoria de extracción y depósito de la mazarota

A partir de aquí, se llevó a cabo la serie de test para validación del prototipo propuesto. El protocolo precisa la generación previa de las trayectorias y consiste en la extracción de ambos pisos y la mazarota, a partir de moldes inyectados en fábrica que no han sido extraídos en ningún momento antes de la prueba en la celda robótica.

Las pruebas se repiten con el conjunto construido por deposición de titanio y el mecanizado convencional. Es importante tener en cuenta la diferencia de masa del sistema extractor en ambos casos, lo que influye en las condiciones finales del sistema robótico, especialmente para el caso del robot colaborativo UR5 en el que se centralizan las pruebas, dado que la finalidad inicial del proyecto consistía en el uso de la robótica colaborativa.

3.1. Categoría A

3.1.1. Modelo 1: Calzado plano caballero

Es el modelo más sencillo, con el que se realizaron todas las pruebas iniciales en los tres robots disponibles. Sirvió para la validación de los sistemas de agarre en sus distintas versiones y como base para el cálculo de trayectorias de aproximación y agarre, tanto de los dos pisos presentes por molde como de la mazarota.

Se ensayaron trayectorias de extracción en los tres robots, consiguiendo el objetivo con el ABB Y el COMAU, pero no con el UR5, por lo que se incorporó el pistón neumático y se reforzó la estructura de anclaje del soporte de los moldes. En estas condiciones, se consiguió la extracción adecuada de los pisos y la mazarota.

3.1.2. Modelo 4: Calzado plano señora

Este modelo presenta especiales características por ser muy plano, lo que conlleva una profundidad de los ahorros del talón $\leq 5\text{mm}$ que no permite la correcta sujeción con la garra; ni siquiera cuando la extracción se realiza manualmente. Por ello, dispone de un apéndice específico en la zona media de la planta para realizar la extracción:

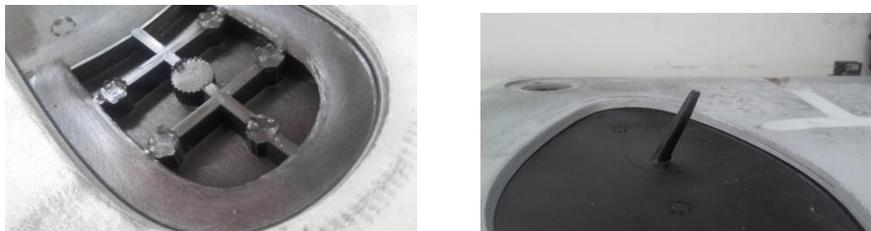


Figura 24: Detalle de ahorros con poca profundidad y apéndice para extracción

En este caso se ensaya la posibilidad de utilizar la garra genérica diseñada para cubrir situaciones de este tipo. La maniobra de aproximación y agarre son satisfactorias, si bien se produce la rotura del apéndice durante la maniobra de extracción, coincidiendo con el accionamiento del pistón neumático. Ello indica que el problema de la extracción no radica solo en la fuerza que el sistema es capaz de aplicar, sino que hay otros condicionantes difíciles de determinar.

3.2. Categoría B: Calzado plano con huella

3.2.1. Modelo 2 y 3: Calzado plano niño/caballero con huella

Se consigue la extracción en la mayoría de los casos, con trayectorias muy cuidadosas que provocan esfuerzos alternativos en diferentes direcciones, principalmente transversales con componentes angulares (torsión)

Aparece crítico el momento de accionamiento del pistón.

3.2.2. Modelos 5 y 6: Calzado plano señora con huella

Caso similar al anterior, presenta variantes relacionadas con el material, especialmente en el caso del modelo 6, que resulta más blando y flexible, apareciendo escapes de la garra.

3.3. Categoría C: Calzado señora con altura

3.3.1. Modelo 7 y 10: Calzado señora con cuña o tacón

En este caso, resulta determinante el inicio de la extracción. La maniobra debe incorporar una importante componente de torsión que facilite la entrada de aire en las zonas laterales del tacón.

Aunque la trayectoria definida ha resultado exitosa en la mayoría de los casos, no se consigue una adecuada repetitividad en el proceso, por lo que no se ha alcanzado una solución que garantice el 100% de extracciones.

Se producen además errores en el cobot:

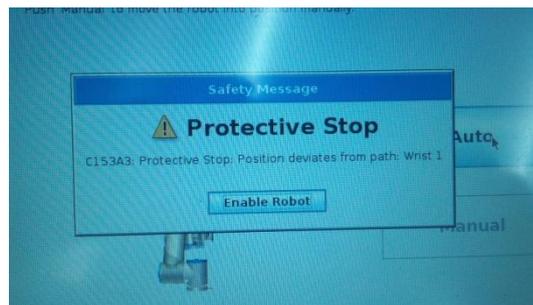


Figura 25: Detalle de parada de protección en UR5

3.4. Categoría D: Calzado señora con huella y altura

3.4.1. Modelo 8 y 9: Calzado señora con huella y altura

Aunque se ha conseguido extraer algunos pisos (modelo 8), no se ha alcanzado una trayectoria que pudiera considerarse viable para la extracción de esta categoría de pisos, apareciendo frecuentes errores en el control del cobot

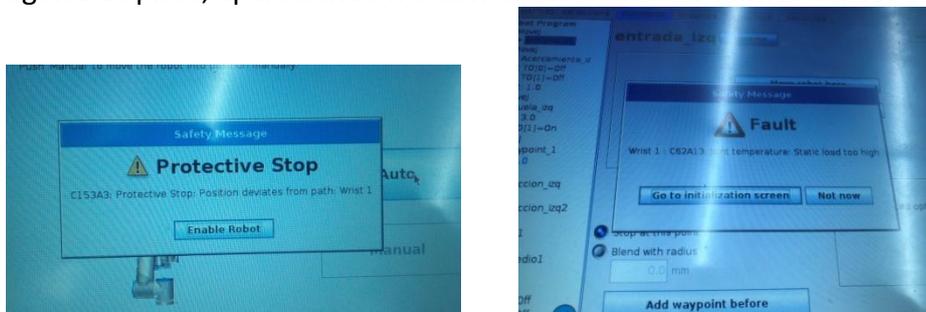


Figura 26: Detalle de parada de protección en UR5

4. Conclusiones

Los resultados de las pruebas realizadas demuestran la complejidad del proceso de extracción de pisos inyectados debido, en principio, a la profundidad de la huella, pero donde influyen otros condicionantes como la flexibilidad del material o su textura, que pueden dificultar las condiciones del agarre provocando escapes de la garra. Se da además la circunstancia, o inconveniente añadido, de que la empresa proveedora de los moldes inyectados no utiliza desmoldeantes, no solo por razones económicas sino, especialmente, por la calidad final del producto y sus mejores condiciones para afrontar los procesos productivos posteriores (adhesión al corte).

Por si esto no fuera ya un hándicap, hay que tener en cuenta que la temperatura de los moldes en el momento del ensayo es inferior a la que tendría en el caso real en fábrica; en estas circunstancias, el material del piso se encuentra totalmente contraído y los esfuerzos necesarios para su extracción son superiores al caso real en cadena de producción.

En cualquier caso, tras las pruebas realizadas, se aprecia que no aparecen errores en las trayectorias de aproximación, posicionamiento y sujeción del piso derecho e izquierdo, repitiéndose en todos los casos un agarre inicial correcto. En el caso de la mazarota, sin embargo, se detectan casos en los que el apéndice de extracción viene roto, por lo que se opta por configurar como punto de entrada el canal de inyección.

En cuanto a la trayectoria de extracción propiamente dicha, se constata la complejidad en su diseño, resultando tanto o más importantes que la fuerza de extracción que es posible aplicar.

Las pruebas realizadas demuestran que no es posible establecer un patrón fijo como herramienta base de diseño de trayectorias, porque se presentan muy dependientes del modelo de piso de que se trate e, incluso, del material; sin olvidar que las limitaciones de carga del robot colaborativo imponen la necesidad de subdividir los pasos de la trayectoria.

Durante el proceso de validación se han producido numerosas roturas de la zona de agarre, lo que es indicativo de que la solución al problema no se limita a la posibilidad de aplicar una fuerza mayor, si no que se trata de una conjunción de esfuerzos y movimientos adecuados. Incluso se ha dado el caso de que trayectorias que han resultado exitosas en un caso, no han conseguido la extracción en otro molde del mismo modelo, por lo que no se ha obtenido la repetitividad necesaria de los resultados como para considerarlos concluyentes.

A la vista de lo expuesto anteriormente, la aplicación de un robot colaborativo para automatizar las tareas de extracción de pisos no parece una solución viable dadas las limitaciones de carga que presenta, aunque la experiencia adquirida demuestra que no se puede reducir el problema solo a un tema de fuerzas, si no que las trayectorias aplicadas tienen también una gran influencia en el proceso.

De esta manera, la sustitución del robot colaborativo por uno industrial con mayor carga, no garantiza necesariamente la resolución del problema, presentando el

inconveniente añadido de que el tipo de máquinas de inyección evaluada no permite su incorporación al sistema, ya que precisaría de una capacidad de movimiento entre puestos que confiere demasiada complejidad a la solución.