
Proyecto Demostrativo sobre el uso de los HFO en espuma rígida de poliuretano Paneles Discontinuos

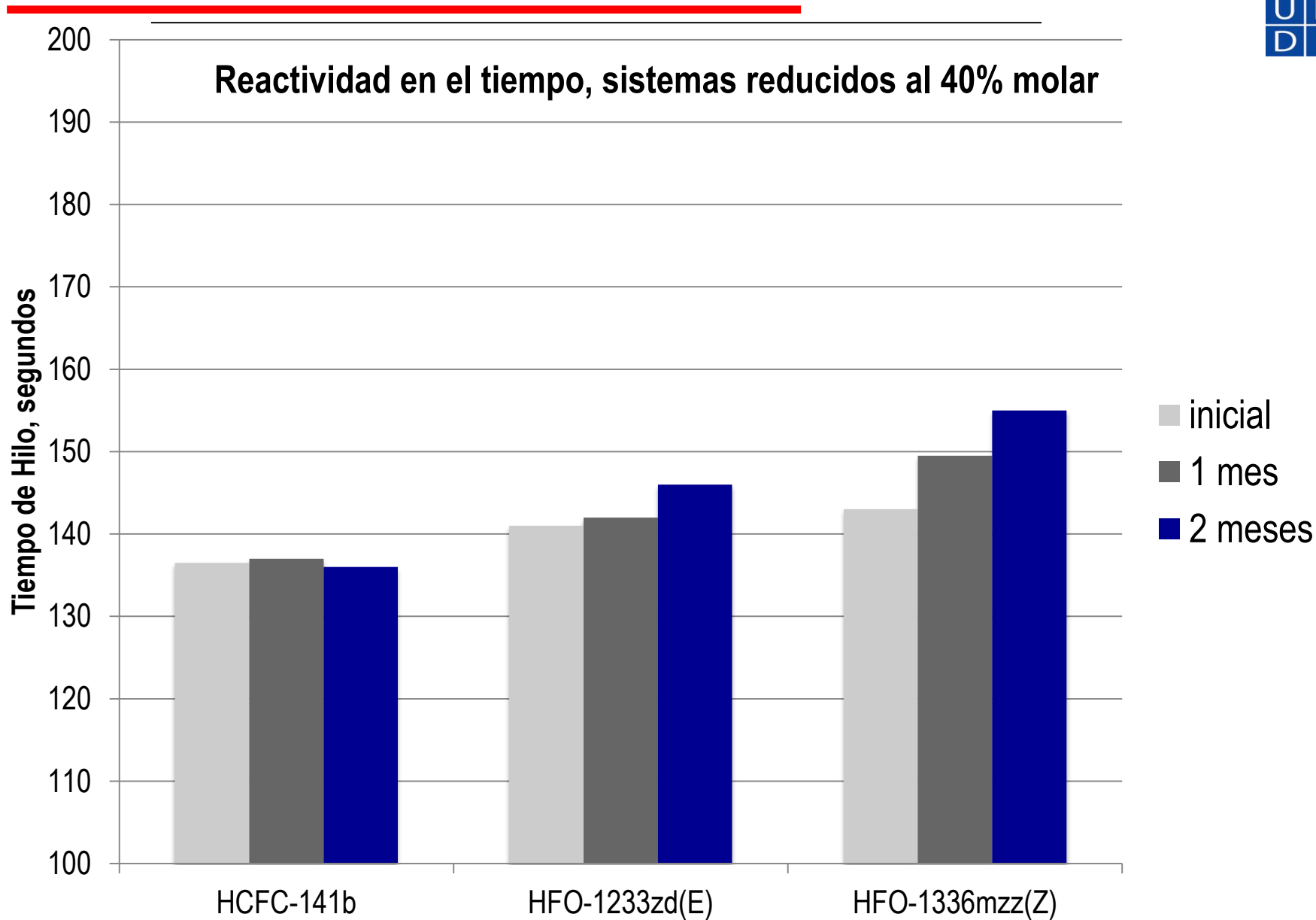
Resultados & Conclusiones

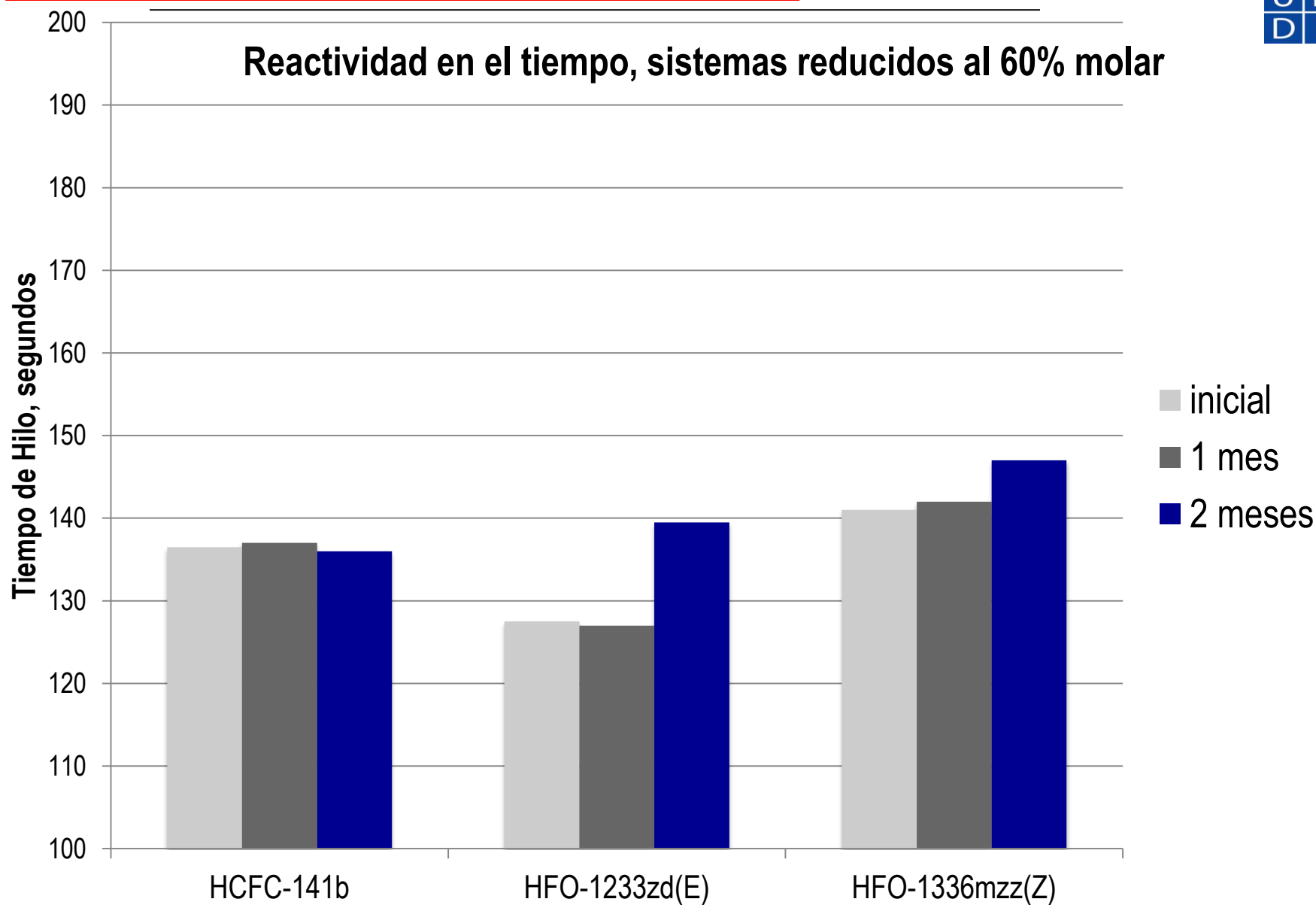
Miguel W. Quintero
Consultor del PNUD

| Diseño Experimental Factorial (duplicado) | |
|---|----------------|
| Factores (variables independientes) | Niveles |
| Tipo de HFO | HFO-1233zd(E) |
| | HFO-1336mzz(Z) |
| Fracción molar de HFO en la celda gaseosa | 0.83 (0%) |
| | 0.66 (20%) |
| | 0.50 (40%) |
| | 0.33 (60%) |
| Patrón: Formulación de HCFC-141b con una fracción molar igual a 0.83 (triplicado) | |

Respuestas: Variables Dependientes

| RESPUESTA | NORMA |
|---|-------------|
| Distribución de Densidad | ASTM D-1622 |
| Índice de Flujo (DMLL/DL) | |
| Desmolde (expansión de espuma en molde Brett) | |
| Factor K | ASTM C-518 |
| Resistencia a la Compresión | ASTM D-1621 |
| Resistencia a la Adhesión | ASTM D-1623 |
| Estabilidad Dimensional a -30° C a +70° C | ASTM D-2126 |
| Inflamabilidad | ASTM E-84 |
| Envejecimiento Factor K (inicial, 2 semanas, 1 mes, 6 meses) Resistencia a la Compresión (inicial, 1 mes y 2 meses) | ASTM D-2126 |





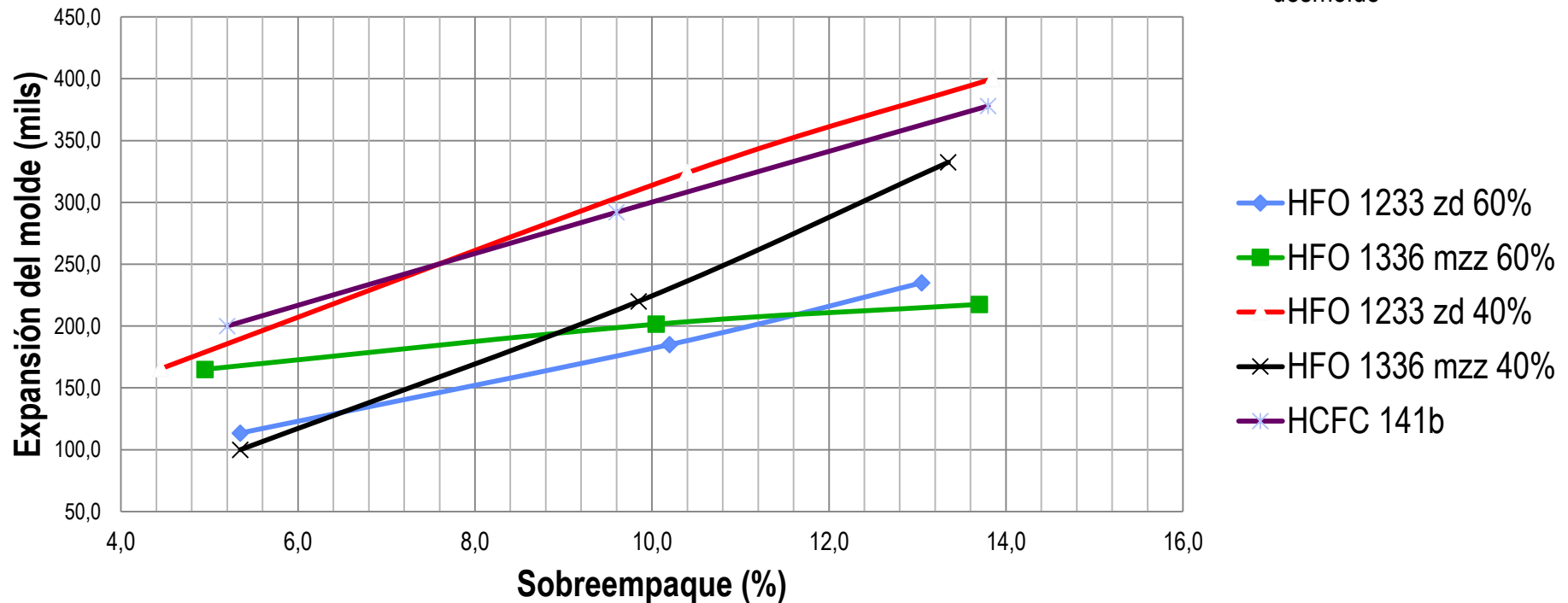
RESULTADOS DE LABORATORIO, INYECCIÓN ALTA PRESIÓN, MOLDE BRETT

| Agente de Expansión | HCFC 141b | HFO-1233zd(E) | | | | HFO-1336mzz(Z) | | | |
|---|------------|---------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| Fracción molar en la celda | 0.83 | 0.82 | 0.66 | 0.51 | 0.32 | 0.83 | 0.66 | 0.50 | 0.33 |
| Porcentaje en peso del agente sopla en formulación (%) | 12.89 | 13.41 | 9.81 | 7.37 | 4.86 | 16.57 | 11.98 | 9.62 | 6.50 |
| Porcentaje de reducción del porcentaje en peso (%) | | | 26.85 | 45.04 | 63.76 | | 27.70 | 41.94 | 60.77 |
| Reactividad en máquina | | | | | | | | | |
| Tiempos de crema/Hilo/Tacto Libre (s) | 10/115/155 | 8/129/187 | 8/142/204 | 8/138/216 | 8/125/244 | 8/140/207 | 9/141/193 | 8/139/216 | 8/140/244 |
| Densidad Libre de Crecimiento (kg/m ³) | 20.1 | 19.7 | 20.6 | 21.0 | 21.4 | 19.5 | 19.7 | 21.2 | 21.1 |
| Densidad Mínima de Llenado (kg/m ³) | 29.3 | 27.7 | 28.15 | 27.85 | 27.5 | 26.2 | 27.2 | 27.5 | 27.0 |
| Densidad moldeada de la espuma (kg/m ³), 16% sobreempaque | 34.6 | 32.4 | 33.0 | 31.4 | 32.1 | 30.6 | 32.0 | 32.1 | 31.6 |
| Distribución de densidad, 16% sobreempaque, desv. estándar | 1.95 | 1.95 | 1.79 | 1.72 | 1.11 | 1.54 | 1.32 | 1.42 | 1.35 |
| Factor K (mW/m.K) | | | | | | | | | |
| Inicial | 21.59 | 22.31 | 23.05 | 23.43 | 23.65 | 22.70 | 22.50 | 23.00 | 23.60 |
| 2 semanas | 22.98 | 23.06 | 23.53 | 23.63 | 23.85 | 23.40 | 23.10 | 23.50 | 23.90 |
| 1 mes | 23.76 | 23.98 | 24.35 | 23.47 | 24.82 | 24.20 | 24.10 | 24.10 | 24.20 |
| Resistencia a la compresión (kPa) a sobreempaque de 16% | | | | | | | | | |
| Resistencia a la compresión, inicial | 98.8 | 92.3 | 100.2 | 75.4 | 72.0 | 86.5 | 97.3 | 94.2 | 89.2 |
| Densidad de núcleo (kg/m ³) inicial | 24.3 | 23.9 | 25.0 | 20.9 | 26.0 | 23.8 | 24.8 | 25.1 | 24.7 |
| Resistencia a la compresión, inicial, ajustada a 32 kg/m ³ | 107.5 | 102.7 | 108.5 | 85.9 | 86.9 | 95.1 | 113.2 | 102.8 | 105.2 |
| Resistencia a la compresión, 2 meses | 97.7 | 90.3 | 97.5 | 69.4 | 84.0 | 82.1 | 99.1 | 97.8 | 89.6 |
| Densidad de núcleo (kg/m ³), 2 meses | 24.0 | 23.6 | 24.4 | 25.1 | 26.0 | 23.7 | 24.6 | 25.1 | 24.7 |
| Resistencia a la compresión, 2 meses, ajustada a 32 kg/m ³ | 132.5 | 98.1 | 166.3 | 114.8 | 115.8 | 88.5 | 111.2 | 131.8 | 166.9 |
| Estabilidad dimensional 70° C (%ΔV) | | | | | | | | | |
| 2 semanas | 2.47 | 1.05 | 0.38 | -0.25 | -1.01 | 2.79 | 1.70 | 0.69 | 0.22 |
| Estabilidad dimensional -30° C (%ΔV) | | | | | | | | | |
| 2 semanas | 0.11 | -0.09 | -0.23 | -0.12 | -0.50 | -0.29 | 0.04 | -0.34 | -0.47 |
| Adhesión a metal (kPa) | 165.7 | 169.3 | 171.7 | 246.5 | 216.5 | 148 | 224.6 | 148.4 | 151.2 |

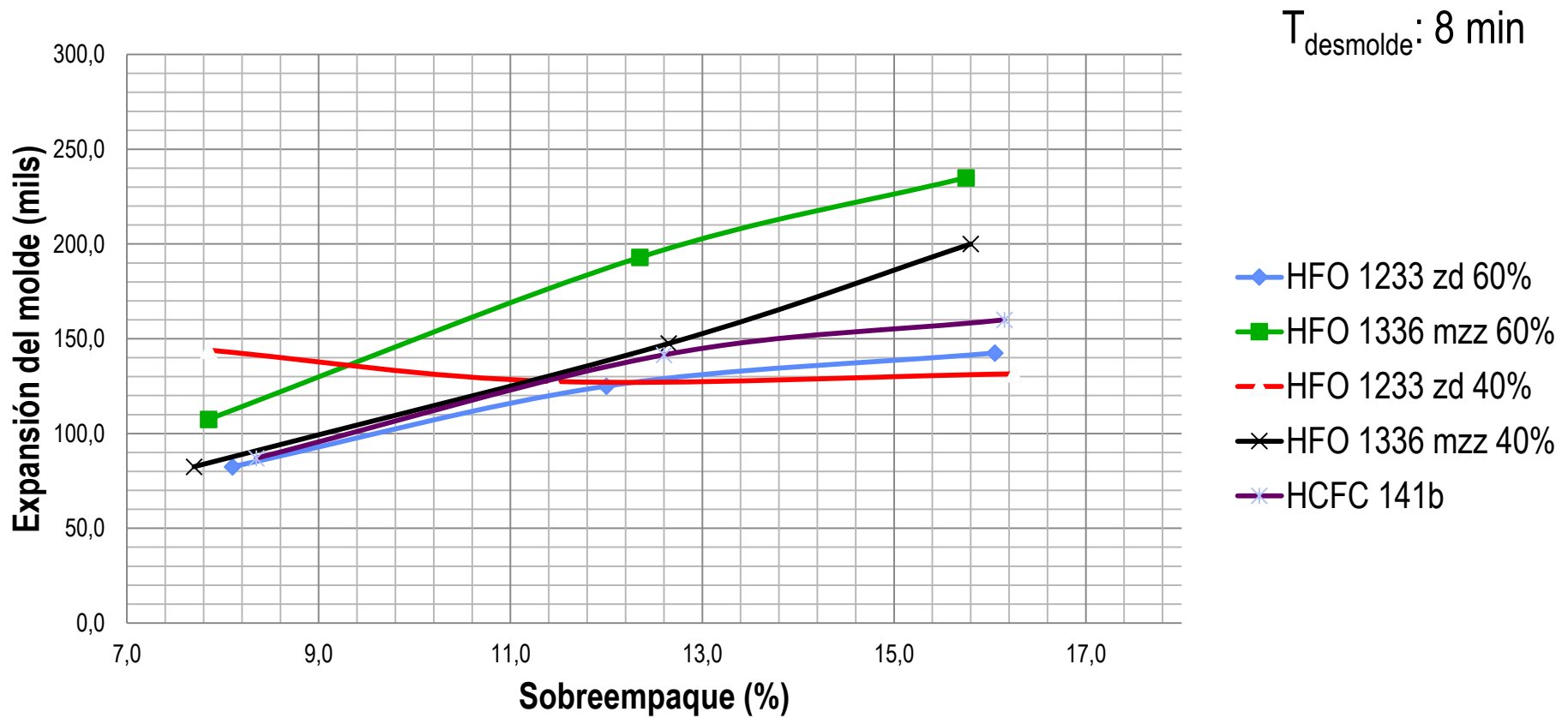
* Todos los datos corresponden al promedio de duplicados genuinos

Desmolde

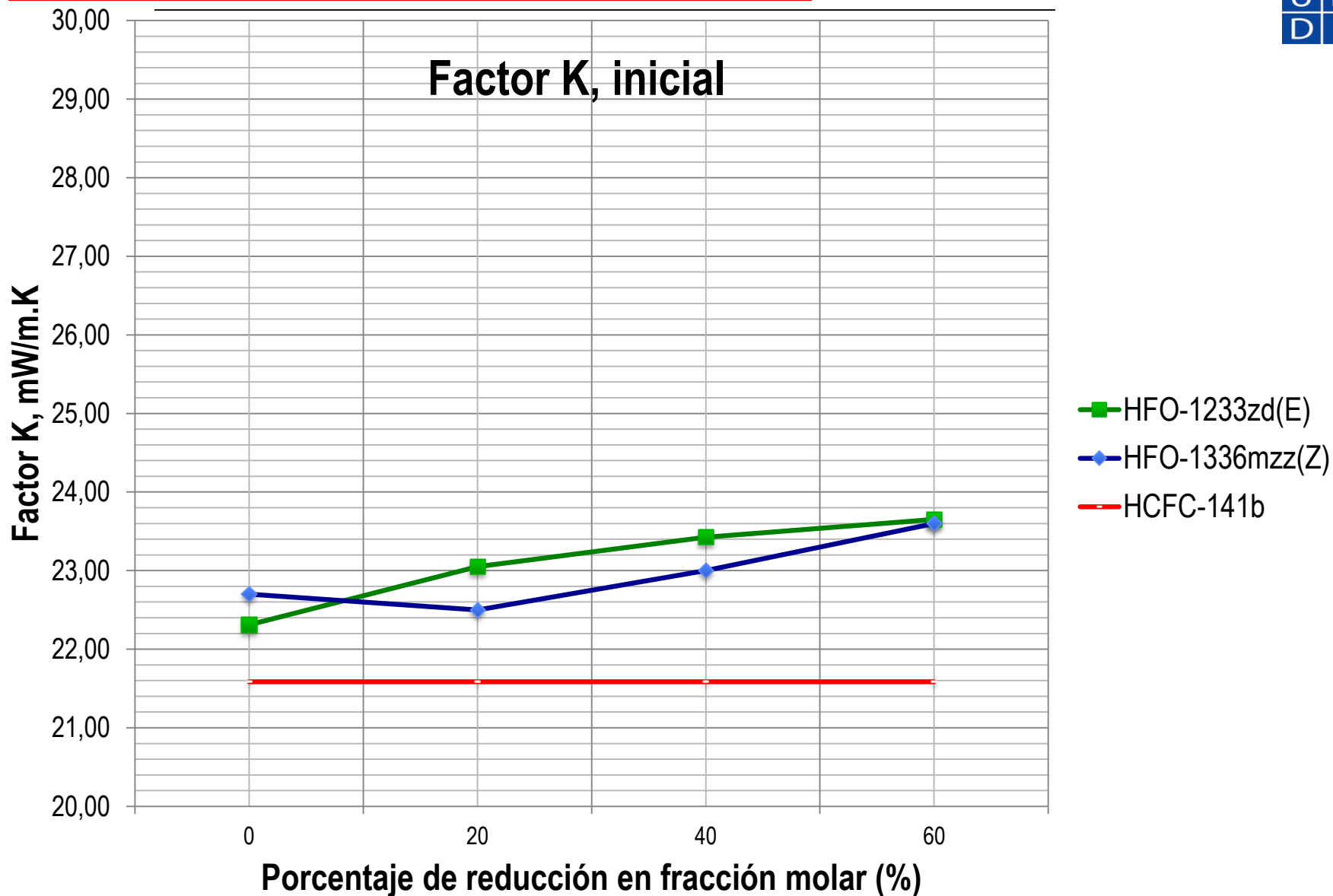
$T_{\text{desmolde}}: 6 \text{ min}$



Desmolde



| Porcentaje de Reducción | Factor K, inicial, mW/m.K | | | | |
|-------------------------|---------------------------|-------|----------------|-------|--------------|
| | HFO-1233zd(E) | | HFO-1336mzz(Z) | | Promedio |
| 0% | 22.51 | 22.11 | 23.10 | 22.30 | 22.51 |
| 20% | 22.85 | 23.25 | 22.60 | 22.40 | 22.78 |
| 40% | 23.05 | 23.80 | 22.70 | 23.40 | 23.24 |
| 60% | 23.60 | 23.69 | 23.40 | 23.80 | 23.62 |
| Promedio | 23.11 | | 22.96 | | |
| Patrón HCFC-141b: 21.59 | | | | | |



ANOVA del Factor K, inicial

| Factor | Grados de Libertad | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | F | P | |
|-----------------------|--------------------|-------------------|----------------|-------|-------|---------------|
| Tipo de HFO | 1 | 0.084 | 0.084 | 0.606 | 0.459 | |
| Fracción molar de HFO | 3 | 2.939 | 0.980 | 7.058 | 0.012 | Significativo |
| Interacción | 3 | 0.513 | 0.171 | 1.232 | 0.360 | |
| Error Puro | 8 | 1.110 | 0.139 | | | |

ANOVA del factor K, inicial

HCFC-141b vs HFO-1336mzz (40%) vs HFO-1336mzz (60%)

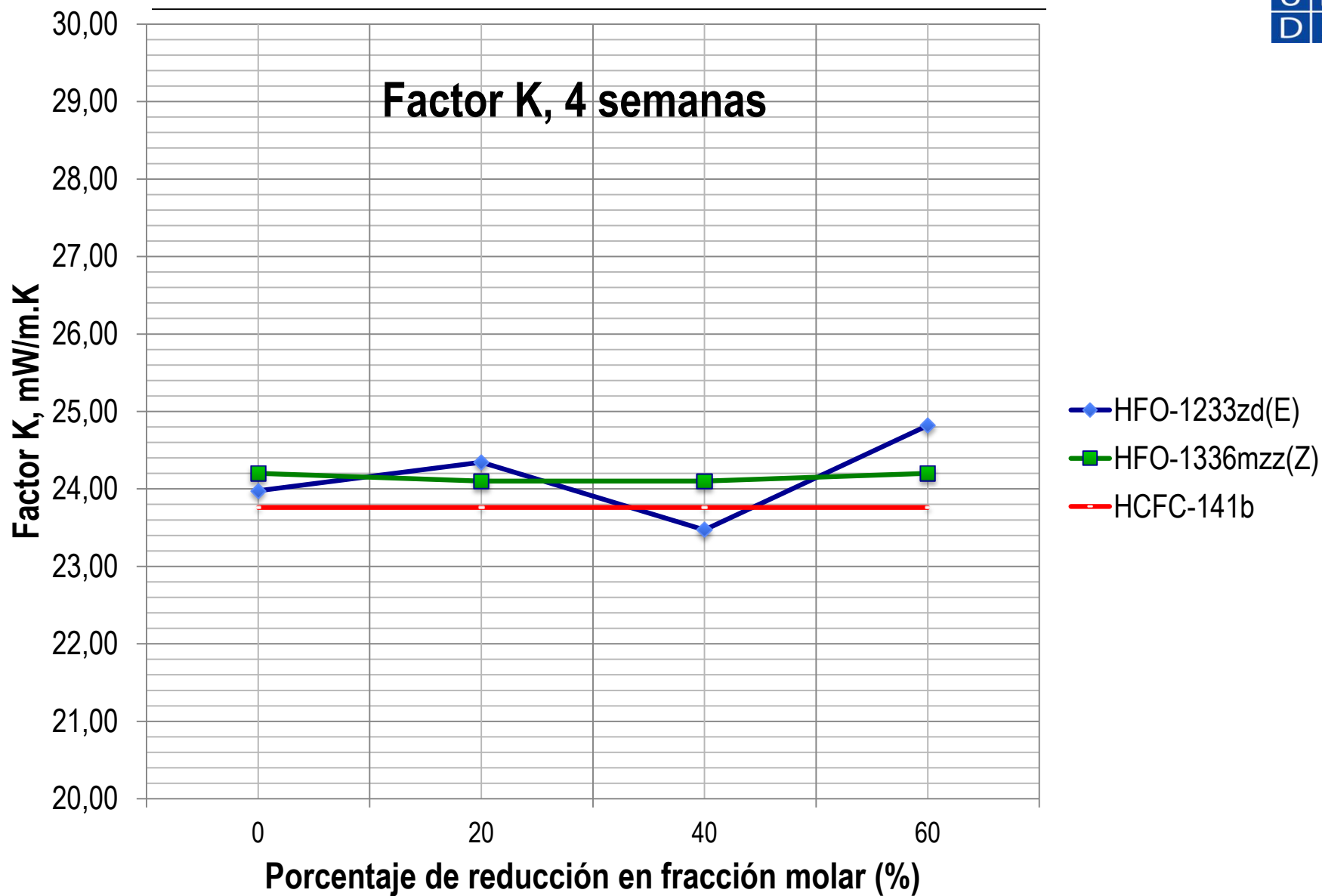
| Factor | Grados de Libertad | Suma de Cuadrado | Cuadrado Medio | F | P | |
|-------------|--------------------|------------------|----------------|--------|-------|---------------|
| Tipo de HFO | 2 | 4.340 | 2.170 | 11.010 | 0.042 | Significativo |
| Error Puro | 3 | 0.591 | 0.197 | | | |

ANOVA del factor K, inicial

HCFC-141b vs HFO-1233zd (40%) vs HFO-1233zd (60%)

| Factor | Grados de Libertad | Suma de Cuadrado | Cuadrado Medio | F | P | |
|-------------|--------------------|------------------|----------------|--------|-------|---------------|
| Tipo de HFO | 2 | 5.120 | 2.560 | 13.910 | 0.030 | Significativo |
| Error Puro | 3 | 0.552 | 0.184 | | | |

| Porcentaje de Reducción | Factor K, 4 semanas, mW/mK | | | | |
|-------------------------|----------------------------|-------|----------------|-------|----------|
| | HFO-1233zd(E) | | HFO-1336mzz(Z) | | Promedio |
| 0% | 24.23 | 23.72 | 25.00 | 23.50 | 24.11 |
| 20% | 24.29 | 24.40 | 23.80 | 24.40 | 24.22 |
| 40% | 24.49 | 22.45 | 23.80 | 24.30 | 23.76 |
| 60% | 24.57 | 25.07 | 24.10 | 24.30 | 24.51 |
| Promedio | 24.15 | | 24.15 | | |
| Patrón HCFC-141b: 23.76 | | | | | |



| ANOVA del Factor K, 4 semanas | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------|------------------|----------------|-------|----------|--|
| Factor | Grados de Libertad | Suma de Cuadrado | Cuadrado Medio | F | <i>P</i> | |
| Tipo de HFO | 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.994 | |
| Fracción molar de HFO | 3 | 1.150 | 0.385 | 0.811 | 0.523 | |
| Interacción | 3 | 0.856 | 0.286 | 0.602 | 0.632 | |
| Error Puro | 8 | 3.790 | 0.474 | | | |

ANOVA del factor K, 4 semanas

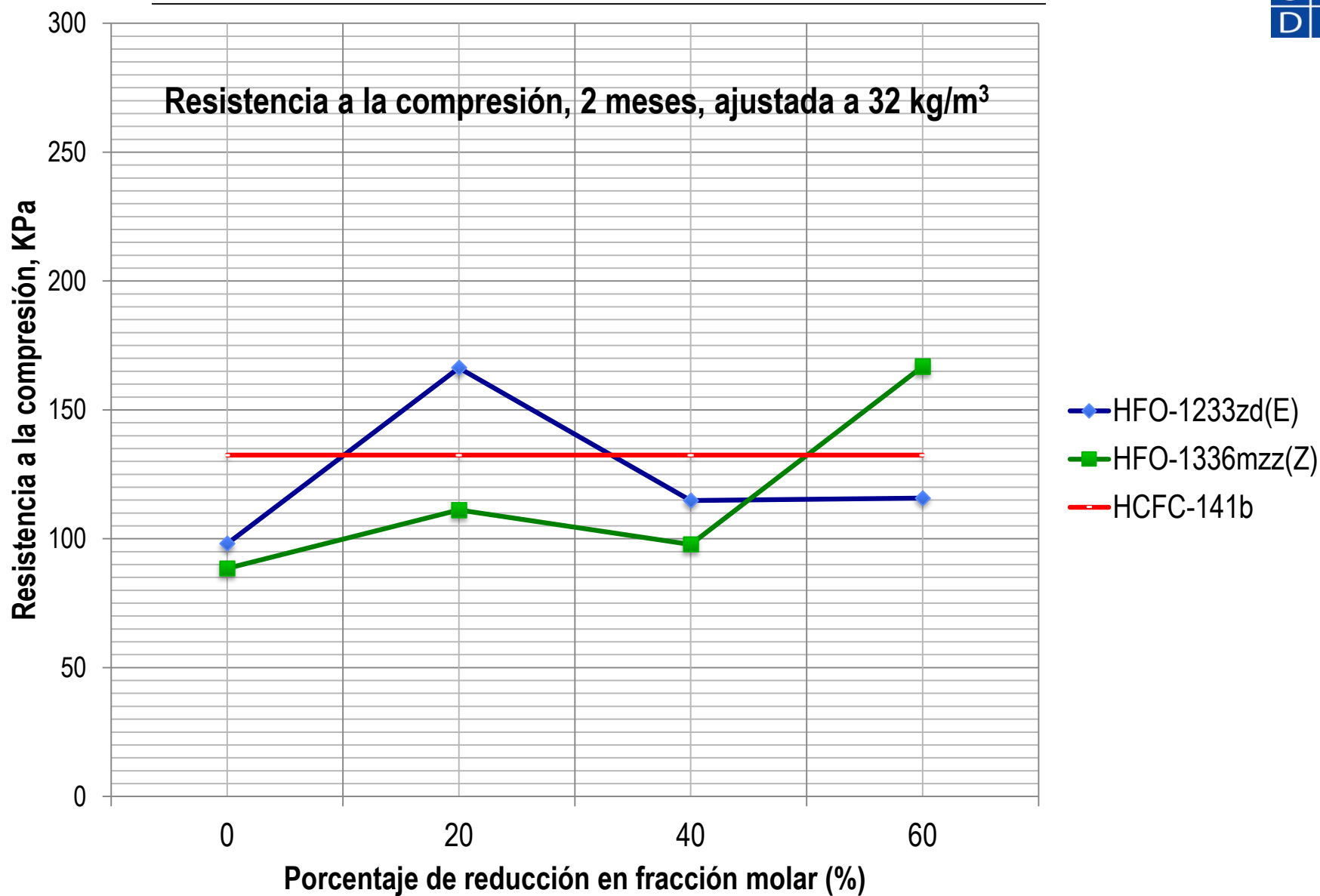
HCFC-141b vs HFO-1336mzz (40%) vs HFO-1336mzz (60%)

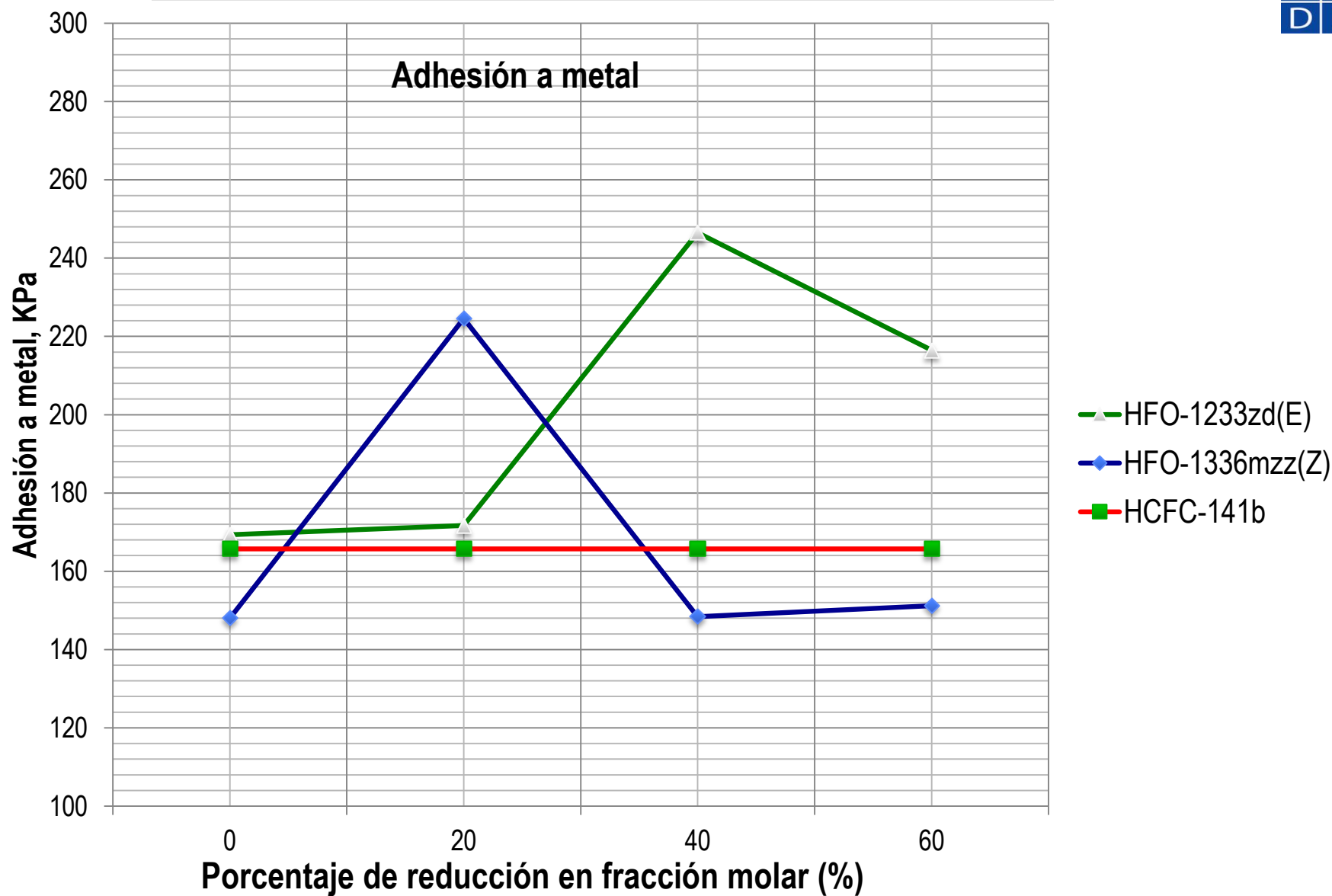
| Factor | Grados de Libertad | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | F | P | |
|-------------|--------------------|-------------------|----------------|-------|-------|--|
| Tipo de HFO | 2 | 0.200 | 0.100 | 0.151 | 0.866 | |
| Error Puro | 3 | 1.990 | 0.663 | | | |

ANOVA del factor K, 4 semanas

HCFC-141b vs HFO-1233zd (40%) vs HFO-1233zd (60%)

| Factor | Grados de Libertad | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | F | P | |
|-------------|--------------------|-------------------|----------------|-------|-------|--|
| Tipo de HFO | 2 | 2.020 | 1.010 | 0.748 | 0.545 | |
| Error Puro | 3 | 4.050 | 1.350 | | | |





RESULTADOS DE PLANTA “ROJAS HERMANOS S.A.”

| | HCFC 141b (1) | HFO-1234zd(E) | | HCFC 141b (2) | HFO-1336mzz(Z) | |
|--|---------------|---------------|-----------|---------------|----------------|-----------|
| Fracción molar en la celda | 0.83 | 0.50 | 0.33 | 0.83 | 0.50 | 0.33 |
| Reactividad en máquina | | | | | | |
| Tiempos de Crema/Hilo/Tacto Libre (s) | 17/119/149 | 8/121/184 | 8/112/167 | 13/115/151 | 7/133/228 | 7/106/177 |
| Densidad Libre de Crecimiento (kg/m ³) | 18.7 | 19.8 | 21.7 | 18.9 | 19.3 | 22.4 |
| Densidad Mínima de Llenado (kg/m ³) | 26.9 | 24.8 | 26.2 | 26.4 | 24.3 | 26.0 |
| Índice de Flujo | 1.44 | 1.25 | 1.21 | 1.39 | 1.26 | 1.16 |
| Densidad moldeada "teórica" (kg/m ³) | 40.0 | 40.0 | 40.0 | 40.0 | 40.0 | 40.0 |
| Tiempo de Desmolde (minutos) | 22 | | | | | |
| Factor K (mW/m.K) | 20.62 | 22.17 | 21.90 | 20.59 | 21.97 | 22.26 |
| Resistencia a la compresión (kPa) | 168.2 | 169.3 | 156.7 | 160.8 | 172.9 | 171.9 |
| Estabilidad dimensional 70° C (% ΔV), 24 horas | 0.91 | -0.68 | -1.15 | 1.11 | -0.18 | -1.02 |
| Estabilidad dimensional -30° C (% ΔV), 24 horas | -0.06 | -0.26 | 0.22 | 0.25 | -0.19 | 0.13 |

Análisis de costos

| Agente de Expansión | HCFC 141b | HFO-1233zd(E) | | | | HFO-1336mzz(Z) | | | |
|--|-----------|---------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| Fracción molar en la celda | 0.83 | 0.82 | 0.66 | 0.51 | 0.32 | 0.83 | 0.66 | 0.50 | 0.33 |
| Porcentaje en peso del agente soplate en formulación (%) | 12.89 | 13.41 | 9.81 | 7.37 | 4.86 | 16.57 | 11.98 | 9.62 | 6.50 |
| Porcentaje de reducción del porcentaje en peso (%) | | | 26.85 | 45.04 | 63.76 | | 27.70 | 41.94 | 60.77 |
| Costo del sistema USD/kg | 2.73 | 3.91 | 3.59 | 3.32 | 3.18 | 5.47 | 4.69 | 4.22 | 3.63 |
| % incremento sobre HCFC-141b | | 43.5 | 31.7 | 21.7 | 16.4 | 100.5 | 71.9 | 54.6 | 33.2 |







CONCLUSIONES

- La tecnología basada en los HFOs **no es inflamable**, no destruye la capa de ozono (**0 PAO**) y es de **bajo potencial de calentamiento global** ($PCG < 2$). No conlleva ningún peligro adicional al HCFC-141b en cuanto a seguridad e higiene industrial
- Fue posible desarrollar formulaciones basadas en HFOs con una **reducción de agente soplate de 61 a 64% en peso**, equivalentes a una disminución de HFO en la fracción molar de la celda del 60%

CONCLUSIONES

En comparación con HCFC-141b, las formulaciones reducidas de HFO mostraron:

- Buena fluidez representada por un menor índice de flujo (relación entre la densidad libre y la mínima de llenado)
- Conductividad térmica inicial de la espuma superior en un 7% en laboratorio (Brett). Este valor fue reproducido en planta
- Similares valores de conductividad térmica de la espuma, cuando medidos a un mes de producida
- Valores comparables de resistencia a la compresión y estabilidad dimensional, tanto en laboratorio como en planta.
- Valores similares de adhesión a metal

CONCLUSIONES

- **No hubo diferencia** significativa -desde la Estadística- entre los dos tipos de HFOs: 1233zd(E) y 1336mzz(Z)
- El **manejo y procesabilidad** en planta de las formulaciones reducidas con HFO fue similar al HCFC-141b
 - ✓ *En climas cálidos los sistemas basados en HFO-1233zd(E) requerirán de un almacenamiento acondicionado de baja/media temperatura*
- Actualmente los sistemas reducidos con HFOs tienen costos superiores al HCFC-141b en **16.4 y 33.2 %** con una tendencia favorable a futuro
- Gracias a la **tecnología de formulación** fue posible reducir significativamente los costos de los sistemas basados en HFOs