INTERLOCKING CONCRETE PAVER PRODUCTION ON SMALL-PALLET CONCRETE BLOCK MACHINES [1] [2]

Greg K. PAGE
Mold Technology Director
COLUMBIA MACHINE INC.
Vancouver, WA, U.S.A.

SUMMARY

Segmental or interlocking concrete paver units are used world-wide as a paving medium for pedestrian and vehicular applications. These products are generally made in machines that are designed for this purpose, having a production capacity of about 0,65 m^2 to as much as 1,4 m^2 of paving stones. These machines have limited ability to produce other concrete products such as concrete building blocks. They generally operate in the 50 mm to 100 mm height range. Some use flat wooden or steel pallets all the way through the curing cycle and some use only a production pallet in the machine, de-palleting immediately after stripping from the mold.

Although manufacturers of these machines market them as multi-purpose machines, capable of making a wide range of masonry products, their most common application in most markets, worldwide, is for segmental paving products. For convenience purposes, these large pallet machines will be referred to in this document as "paver" machines.

Automatic concrete block machines are much more common around the world. The first machines of this type were produced over a hundred years ago and are now made in Europe, Japan, Korea and the U.S.A. (smaller machines, and with different degrees of automaton are produced in Mexico, Colombia, Argentina and South Africa). They are primarily designed to make hollow and solid concrete building blocks of a 200 mm x 200 mm x 400 mm module but often produce products as high as 300 mm and as long as 500 mm.

Although manufacturers of these machines market them as multi-purpose machines, capable of making a wide range of masonry products, their most common application in most markets, worldwide, is concrete block products. Therefore, for convenience purposes, these machines will be referred to in this document as "block" machines.

Although they use varying degrees of automation to deliver raw material into the machine and to remove and cure "green" products, the basic production process for all machines is the same and also fundamentally the same as paver machines.

[1] The editors used the International System of Units (SI) in this book of Proceedings, and the comma "," as the Decimal Marker. Each paper is presented first in English and then in Spanish, with the Tables and Figures, in both languages, placed in between.

[2] This is the original version of this paper.

Material is delivered to the mold area by a horizontally moving "feed drawer" which drops material into the mold by force of gravity, agitation and vibration. The mold has solid vertical walls but is open on both the top and bottom horizontal surfaces. The bottom horizontal surface is closed by a flat wooden or steel pallet.

When enough material has been fed into the mold, the feed drawer is retracted and the material is then vibrated so that it is consolidated, densified and evenly distributed throughout the mold cavities. A compression head then compacts the material from the top, to a finished height.

At this point, the product is completed and must be removed from the mold. To do this, the product and pallet are moved down through the mold until they are free and clear of the bottom of the mold or on some machines, the product and pallet are left in their completed position and the mold is stripped up until it is free of the product. In either case, once the product is free of the mold, it can be transported out of the machine on it's pallet so that a new pallet can be inserted and the process can repeat.

These machines are designed primarily to make products with heights of 100 mm to 300 mm with the majority of their production done in the 200 mm range. Machine cycle times can be as fast as 6 s and are commonly in the range of 8 s to 10 s.

These block machines commonly have a production capacity of as little as 0,13 m^2 or as much as 0,55 m^2. The biggest are in the range of 0,78 m^2. Since these machines most commonly produce concrete blocks in a 200 mm x 200 mm x 400 mm module, block machine producers often refer to their machine's capacity as 1-block, 2-block, 3-block, etc. For the purpose of this study, I will be discussing 2, 3 and 4-block machines. Automatically cycling 1-block machines are available but are rarely used. The most common pallet sizes for 2 to 4-block machines are:

- 457 mm x 508 mm (18x20") 2-block
- 470 mm x 660 mm (18-1/2x26") 3-block
- 470 mm x 940 mm (18-1/2x37") 4-block

These pallets are usually steel and are generally 6 mm to 10 mm (5/16" to 3/8") thick.

For the purpose of this study, machines of this size will be referred to as "small-pallet" block machines. This paper will discuss the feasibility, advantages and disadvantages of producing segmental or interlocking pavers on small-pallet block machines.

1. HISTORY

Segmental pavements using cobblestones are thousands of years old and many early examples survive today. Paving with manufactured cobblestones started in Europe about 300 years ago, but large capacity, automatically cycling concrete paver machines did not appear until after World War II. These machines were, and continue to be, primarily built in Germany. By the 1960-70s, concrete pavers had gained a strong market niche in Europe and single-purpose paver machines were available from at least five German machinery producers. Much of today's technology of concrete pavements was developed there at that time and continues today.

As the market and technology matured in Europe, it began to spread around the world. Architects, landscapers, contractors and homeowners in Australia, New Zealand, South Africa, the U.S.A., Canada and Latin America began to request these pavements. But existing concrete masonry producers were reluctant to invest in machinery when the market was this small. So a few block producers in these countries began to experiment with paver production in the early 1970s on their existing concrete block machines.

Results were mixed. Block producers had almost never produced any kind of product below 90 mm high and had never produced anything requiring such high compressive strengths. 60 mm to 80 mm heights were required with compressive strengths of 55 MPa (8 000 psi). Cement and water ratios were very different. Many aggregates that worked well for load-bearing concrete blocks were completely inadequate for concrete pavers.

The chamfered edges around the top of pavers are a requirement of most segmental paver systems but block machines did not work well with these chamfers. When the pavers were stripped out of the mold and the compression shoes were pulled away from the top surface, a vacuum was created and sticking occurred. Pieces of the paver top surface pulled away sticking and building up on the compression surfaces, causing deteriorating aesthetic performance.

German paver machine producers had early on solved this problem with vibration systems that typically applied vibration through the top and bottom (compression head and pallet) surfaces of the machine. Chamfered compression shoes released from the top of newly made pavers without pulling up aggregate. Pavers made this way had a smooth top texture.

Block machine designers had to accommodate much higher concrete products, most often 200 mm to 250 mm high, and vibrating from the top and/or bottom was not as effective for these kinds of products. Their machines typically vibrated the mold itself without applying direct vibration to the compression head or pallet. This was generally considered to be the best technique for vibrating tall products but created a problem with pavers having a chamfered top edge.

Early experimenters tried a number of technologies in an attempt to eliminate paver sticking in their block machines. Water percentages were lowered but strengths fell off because of incomplete hydration of cement. Additives were added but only slight improvements were achieved. Sprays were applied to the compression shoes before compaction but this created a nasty environment around the machine and tended to cause staining and discoloration of the pavers.

Heating the compression shoes by various means was tried and there was an immediate improvement. In fact, sticking could be eliminated completely as long as the heat could be consistently applied. But it took years to perfect shoe heating systems that would survive the violent and dirty environment in which block machine compression shoes operate. Typical electrical connections failed due to vibration and airborne dirt. Normal insulated wiring failed for the same reason and because of high temperatures.

Commercially available strip, ring, disc and cartridge-type heating elements were tried. Reliability was a big problem since these types of elements typically rely on heat generated by resistance through small diameter coiled wire and vibration destroyed them.

Experimenting went on with these technologies for about five years. Appropriate wiring technologies were developed. Mold compression heads were designed which kept all the wiring enclosed, isolated and shielded from the destructive manufacturing environment.

When experimentation with all commercially available heating elements was exhausted, purpose-built heating elements were developed. These were so successful that they immediately became the industry standard.

Temperature controllers were also developed. Initially they were timed controllers that simply cycled the elements on and off for preset periods of time. Thermostatically actuated controllers were also developed which allowed the input of an operating temperature to be maintained during production.

Concurrently with the development of reliable heating designs, paver mold grid design was developed and refined. Mold producers had problems with mold overheight. Mold overheight, the distance from the top of a finished product in the mold to the top of the mold, was different from producer to producer because all the other production variables had not been optimized. One customer consolidated the material in the mold effectively enough during vibration that only a small amount of compaction with the compression head was necessary. These producers needed as little as 5 % mold overheight. But the next customer relied less on vibration and more on compaction to achieve finished height. These customers wanted two or three times that amount of overheight.

But after a few years of mostly independent experimentation by producers, the most successful production process became widely known and documented by mold and block machine producers. Requirements for aggregates, sands, cements and additives began to emerge. These requirements were often quite different from materials used for conventional blockmaking. As raw material selection was refined and machine settings were understood, resulting strength and absorption qualities came right in line with world standards and with products made on paver machines.

Since concrete block machines were designed to make blocks primarily using vibration, not tremendous compression forces, that process eventually became the standard for paver production on these machines. Mold overheight design issues were then resolved by most mold using much smaller overheights than comparable dedicated paver machines.

Technology for paver mold grids for dedicated paver machines also developed along different lines at this time. Grids were flame-cut and hand finished. Grids were machined from solid stock. Grids were fabricated from small elements and welded together. Castings were also used.

Ultimately the most cost-effective process was flame-cutting and this has become the industry standard. In this process, steel alloys are used which either have increased hardness before the production process, steels whose hardness increases during flame-cutting and/or steels which can be hardened after cutting. Paver mold producers who specialize in molds for large-pallet, dedicated paver machines have developed very advanced flame-cutting techniques that are exceptionally accurate compared to normal flame-cutting standards.

As mentioned earlier, dedicated paver machines did not require heating of the compression shoes to work effectively and reliably. But compression shoe technology did evolve for these machines too. Stamped or forged shoes, cast shoes and shoes machined from solid stock have all been made.

Block mold producers entered the paver mold business from a different perspective. Their block molds needed to be very accurately sized, last a long time and have replaceable wear elements. Market pressure for longer and longer lasting molds pushed the industry to an accepted standard of molds with case hardened, replaceable wear parts fitted into a permanent frame. This block mold technology was the industry standard before 1950 and continues, with improvements, today.

Block mold producers also experimented with fabricated paver mold grids and castings, but early on they settled almost exclusively on machined-from-solid paver grids. This decision was influenced by three important factors:

- First, block machines almost exclusively vibrate the mold itself. This means considerably more force is applied to the mold than on dedicated paver machines which shake the pallet and compression shoes.
- Second, block mold producer's manufacturing technologies did not include the skills necessary for hand cutting, grinding and fitting of cast, fabricated or flame-cut molds. They were much more comfortable with machining to close tolerances, required for their block molds with replaceable wear elements.
- And last, since their mold manufacturing technology already included case hardening, block mold producers naturally wanted to heat-treat these molds. It was a natural technology fit and was a big contributor to making paver production on small-pallet block machines an economically viable alternative to dedicated paver machines.

2. HEAT-TREATED PAVER GRIDS

Although heat-treating was the immediate choice of all the block mold producers for their paver molds, it was not an immediate success. Heat-treating paver grids with a perimeter mass, multiple voids in the center and lots of small web cross-sections was a stretch for conventional heat-treating processes.

The common technology that gets hardness results which are compatible with concrete block making is called carburizing. This is a case-hardening process which can yield a 2 mm case or "skin" at the surface of the hardened part which has a hardness in the range of Rc55-65. This is in the same hardness range as a drill bit for normal steels. Conventional steels can be carburized with decent results but there are steel alloys available which improve results, getting the highest hardenesses, the deepest case depths, and the most consistency from the process. The carburizing process is so popular and universally available around the world, that carburizing alloys are readily available in most parts of the world.

The carburizing process usually involves "soaking" the hardenable part at very high temperatures in a carbon-rich atmosphere for a few hours, then immediately quenching it in an oil bath. When this process is used on the kind of flat plates common to concrete block molds, some distortion usually occurs. But because the center or "core" of carburized parts stays relatively soft and malleable, the hardened parts can usually be straightened by bending after heat-treating if necessary.

Paver grids are subject to even more distortion than most regular block mold components because of their shape and distribution of mass. And their shape makes if virtually impossible to straighten them after heat-treating. So block mold makers had to find new tricks and methods to use carburizing for their paver grids. They were successful enough that eventually they have even been able to carburize paver grids up to 700 mm x 1,4 m in size.

Carburized paver grids and shoes for small pallet block machines usually yield a minimum of 100 000

machine cycles, often as many as 200 000 cycles, before they are worn to the point of replacement. This can be 2 to 3 times the life of a flame-cut paver mold in a dedicated paver machine. So although the per-cavity price of molds made this way may be 2 to 3 times higher than a mold for a dedicated paver machine, the mold cost per paver, although usually higher, can be competitive with dedicated paver machines (see Table 1).

3. UNIFORMITY, ACCURACY AND HEIGHT CONTROL

Pavers need to have consistent density, height and size inside each cycle and from cycle to cycle. Filling during the production cycle is a key component in uniformity.

As described earlier, filling in both "block" and "paver" machines is dependent on an open bottomed drawer (feed drawer) which uses gravity with agitation and vibration to fill the mold cavities as the drawer first runs out over the mold and then returns back into the machine. As the feed drawer travels it's forward and backward paths, the level falls. So the mass of the material falling downward is steadily decreasing. Because the drawer is moving horizontally, horizontal forces also act on the mass which are magnified when the entire mass has to stop and reverse direction.

Because of these problems, it is very difficult to get exactly the same amount of material distributed equally across the whole production area. There are often differences from side-to-side, but especially from front-to-back. The front-to-back filling problem is a linear problem -- the longer the path (the deeper the pallet), the bigger the problem. This is where a smaller pallet, especially shorter front-to-back, can have a real advantage.

As the front-to-back dimension gets over 500 mm, machines usually then are forced to overfill some of the cavities to get the minimum amount of material into a few. Then the machine has to do most of it's work during compaction. However, with pallet dimensions less than 500 mm the difference in density from front-to-back is small enough that most of the densification and consolidation can be done with vibration not compaction. This makes a more uniformly densified and therefore more consistent end product. It can be assumed that in comparing two pavers of equal weight, a paver with uniform density from top-to-bottom, will test higher in compressive and flexural strength than a paver which is denser on the top and/or bottom than the center.

Since small-pallet block machines can densify primarily with vibration, height control and consistency are improved. A ± 0,5 mm height variation can often be achieved with these machines. Pavers produced with small-pallet machines can then have a marketing advantage because installers want every paver to be exactly the same height. And since most markets have a 2 mm to 5 mm height tolerance in effect, small pallet producers can often produce to the low end of the tolerance, saving as much as 8 % in raw material.

Of course another obvious advantage is machine cycle time. Much shorter feed drawer travel distances are the biggest contributors to the faster machine cycle times for small- pallet "block" machines. Note the cycle time comparisons on Table 1.

The height and shape accuracy improvements generally gained from pavers produced on small pallet block machines can be a big benefit in mechanical laying applications. These laying machines squeeze a square of pavers from both horizontal axis, pick up the square, and drop it in position. If the pavers have inaccuracies in their shapes, individual pavers will fall out of the squares when they are squeezed.

In the current Hong Kong Airport paver installation, a block machine paver producer was chosen because among other considerations, he could guarantee the necessary tolerances and exceptional repeatability of the delivered pavers.

Another advantage of the more consistent filling achieved with a short-stroke feed drawer, is in making very thin pavers. Most paver machine producers list 50 mm as their minimum production height. 40 mm may be possible in some of these machines. But that is the practical limit.

Small pallet block machines can easily produce at 40 mm heights and 25 mm is done regularly. 22 mm has been done successfully but 25 mm can be considered the practical limit.

Thin pavers, less than 60 mm, are a growing market in many regions of the world for non-vehicular, low load pavements and for overlays of existing pavements. At this time, block machines are the only production option for the thinnest of these pavers.

4. MOLD COSTS

Producers measure mold costs in different ways. For this discussion, mold costs are calculated as the purchase cost (not counting freight, taxes, etc.) divided by the total number of pavers made. This is referred to as "mold cost per paver".

As mentioned earlier, mold producers for these small-pallet block machines typically mill out the paver cavities from solid steel plate. With today's computer controlled milling machines, accuracy and repeatability of paver mold cavity shapes is extremely high. This has a significant effect on mold costs if a block machine paver producer needs to make the same paver in two heights. In applications like this, for instance making 60 mm and 80 mm high pavers, the producer can purchase two paver grids, 60 mm and 80 mm, but use the same compression head interchangeably with both grids.

This also applies to replacement paver grids and shoes. A block machine paver producer can buy a replacement paver grid and individual shoes but reuse his compression head assembly. Replacement molds for large pallet paver machines are almost

exclusively supplied as complete assemblies, including new compression heads, because cavity and compression shoe repeatability is generally not accurate enough.

Although initial mold costs (per paver) for pavers produced on block machines are often higher (see Table 1), interchangeability can lower the effective cost over a period of time. As an example (see Table 2), a 470 mm x 660 mm small pallet block machine has an initial mold cost of US$ 0,007 per paver which is 30 % higher than some big pallet paver machines. However, after the 3rd mold rebuild, the effective mold cost per paver, drops to US$ 0,005 which matches the best big pallet paver machine mold costs per paver.

5. RAW MATERIAL COSTS

Block machines which produce pavers use the same aggregates and cements that paver machines do. With the variations in density that can happen with a long stroke feed drawer, large-pallet paver machine producers sometimes increase cement ratios to insure that minimum strength and density requirements are met for all the pavers on each cycle. However, if consistency of density is improved in a paver made on a small pallet block machine compared to a paver made on a large pallet paver machine as discussed earlier, then cement percentages can be lowered in the block machine, compared to a large-pallet machine, while still maintaining necessary strength and absorption levels.

6. FLEXIBILITY

Paver machines, as defined in this document, can make concrete blocks and other masonry products like retaining wall units, curbs, etc. And block machines can make pavers. It would be difficult to argue that a small-pallet block machine is the perfect solution for an application that produces nothing but pavers. Paver machines are the obvious answer for those applications. But when markets are available with demand for both blocks and pavers, and the capacity of a small pallet block machine can meet demand for both products, a block machine can be the best solution for the application.

Block markets, including retaining wall and other landscape products, are diversifying. The market for concrete blocks is steadily moving from commodity to value-added in many markets. Split and textured faces, custom shapes and sizes, seismic designs, mortarless systems, retaining wall systems, etc., all continue to increase market share, while plain building block sales hold their own or tend to decline in market share.

This is where a conventional block machine performs best. They were designed and have developed over the years for this type of flexible production. Molds are fairly small, 2 to 4 blocks/cycle for this study, and have changeable elements so that the molds can be reconfigured to make different products or products with different features. It is not uncommon for a typical North American block factory to have 50 or more block molds in inventory.

Contrast this with a paver machine that makes 12 or even 18 blocks at a time. These molds are big, complicated, and usually can't be modified or adapted very easily. Because of their size, they are very expensive and there are few large pallet producers who have more than ten of these molds. Production flexibility can be a real problem. Quick changes to new markets or changes in existing markets can be difficult. Yet that is increasingly where masonry production is heading.

Because of their high production speeds, 2 to 4, 200 mm x 200 mm x 400 mm wide blocks per cycle and 7 to 10 cycles per minute, small-pallet block machines can accommodate most urban block markets. Production of 12 to 18 blocks per cycle can be overkill for most markets unless they are in very large urban areas. If a mix of paver and blocks can fit a local market, a small pallet block machine can be the best production fit.

7. CAPACITY

Table 3 demonstrates the capacity, expressed in single family dwellings, of small pallet block machines with a mixed production of blocks and pavers. For comparison purposes, a single-family, single story dwelling was chosen with 144 m^2 (1 550 sqft) of living space and 40 m^2 (430 sqft) of paver surface area (walkway/driveway/patio). Note that production capacity for single, small pallet machines, working one shift per day, is from 669 to 1 337 single family dwellings per year, depending on machine size. Under normal growth conditions, in a market with 50 % of residential new construction in concrete block masonry, this production would support a typical market with population of 150 000 to 300 000 people. And this is all based on a totally residential model. Mixed models with less residential construction and more commercial are more likely and just as practical in this market size. More production capacity than this is wasted on markets of this size except in those few markets where concrete block masonry and paver pavements are the exclusive construction materials. Those markets are infrequent.

8. BLOCK MACHINE DISADVANTAGES

Other than capacity limits based on pallet size, the only serious disadvantage to paver production on small-pallet block machines is post-production cubing and palletizing. Large-pallet, dedicated paver plants usually have vacuum or clamp-type cubing systems which are designed to cube thin courses with irregular perimeter shapes. And in many cases, the delivery cube tier size is the exact production size, so pavers don't have to be accumulated and manipulated to form delivery pallet cubes.

Block plants on the other hand, usually have cubing machines that are designed primarily for taller products with straight, parallel sides--concrete blocks.

Many paver shapes, like the common rectangular or square shapes work fine with these cubing systems. But some shapes require modifications to the cubing systems to work automatically. Moving irregularly shaped pavers around by pushing on their sides to form delivery pallet tiers, can be a challenge.

9. CONCLUSIONS

Small pallet block machines are a good fit for paver production in mixed production applications where concrete blocks and pavers need to be made in the same production line. Limitations are capacity and size of the market being served. Although production capacity is limited in these machines, annual production is enough for demand in a huge amount of new and existing markets around the world.

In a mixed demand market of moderate size, where pavers and concrete blocks both need to be supplied, a small-pallet block machine is a better fit for both products than a large-pallet paver machine. The same logic can be argued for dedicated production. The paver machine is the better solution for pavers-only production and the block machine is the best solution for block-only production.

PAVER MOLD *MOLDE PARA ADOQUINES*	PAVERS PER CYCLE *ADOQS. POR CICLO*	MOLD PRICE *PRECIO DEL MOLDE* (US$)	CYCLE LIFE *CICLOS DE VIDA*	MOLD COST PER PAVER *COSTO DEL MOLDE POR ADOQUÍN.* (US$)
Initial Purchase *Compra*	12	13 000	150 000	0,007
1st Rebuild *1a Reconstr.*	12	9 100	150 000	0,006
2nd Rebuild *2a Reconstr.*	12	9 100	150 000	0,006
3rd Rebuild *3a Reconstr.*	12	9 100	150 000	0,006
4th Rebuild *4a Reconstr.*	12	9 100	150 000	0,005

Table 2. 470 mm x 660 mm pallet block machines.
Tabla 2. *Máquinas de bandejas de 470 mm x 660 mm.*

PAVERS PER CYCLE [1] *ADOQUINES POR CICLO*	MACHINE TYPE [2] (PALLET) *TIPO DE MÁQUINA (BANDEJA)*	APRX. PALLET OR PROD. SIZE *TAMAÑO APROX. DE BANDEJA*	MOLD LIFE CYCLES [3] *CICLOS EN LA VIDA*	PAVERS PRODUCED *ADOQUINES PRODUCIDOS*	MÁX. LIFE WEAR [4] *DESGASTE MÁX. EN VIDA*	CYCLES [5] *CICLOS*	CYCLES [6] *CICLOS*	WEAR *DESGASTE*	TOTAL RUN *FUNICIONAMIENTO*	PRODUCTION *PRODUCCIÓN*	MOLD COST [6] *COSTO MOLDE*	
											TOTAL APRX. *TOTAL APROX*	PER PAVER *POR ADOQ.*
		(mm)		(Total)	(mm)	(# / min)	(# / 8h)	(mm / 8h)	(d)	(m^2 / 8h)	(US$)	(US$)
8	SMALL	457 x 508	150 000	1 200 000	1,5	7	3 360	0,034	45	522	10 000	0,008
12	SMALL	470 x 660	150 000	1 800 000	1,5	7	3 360	0,034	45	782	13 000	0,007
16	SMALL	470 x 940	150 000	2 400 000	1,5	7	3 360	0,034	45	1 043	17 000	0,007
36	LARGE	700 x 1400	75 000	2 700 000	1,5	3	1 440	0,029	52	1 006	15 000	0,006
36	LARGE	1 100 x 1 400	40 000	1 440 000	1,5	3	1 440	0,054	28	1 006	12 000	0,008
54	LARGE	700 x 1 400	75 000	4 050 000	1,5	3	1 440	0,029	52	1 509	20 000	0,005
54	LARGE	1 100 x 1 400	40 000	2 160 000	1,5	3	1 440	0,054	28	1 509	15 000	0,007

[1] Based on 98 mm x 198 mm rectangular paver. This is the most common shape/size paver used around the world and is generally used for capacity and performance comparisons. */ Basado en adoquines rectangulares de 98 mm x 198 mm. Esta es la forma y las dimensiones más comunes alrededor del mundo y se usan generalmente para comparaciones de capacidades y comportamiento.*

[2] "Large pallet" machines are available in many production configurations, both larger and smaller than the two listed. The two sizes chosen for comparison, represent production capacity for a large proportion of currently available machines. */ Máquinas de "bandeja grande" se consiguen en muchas configuraciones de producción, tanto más grandes como más pequeñas que las de la lista. Los dos tamaños escogidos para la comparación, representan la capacidad de producción para una gran parte de las máquinas disponibles actualmente.*

[3] 150 000 cycles represent fully heat-treated, carburized and case-hardened paver molds. 75 000 cycles represent flame-hardened or similarly performing wear resisting processes. 40 000 cycles represent non-case-hardened molds. */ 150 000 ciclos para un molde completamente tratado con calor, carburizado y con caja endurecida. 75 000 ciclos para un molde endurecido con llama o con un proceso similar para resistencia al desgasto. 40 000 ciclos para un molde no endurecido.*

[4] Mold wear causes an overall increase in size for pavers. Some shapes, because of their interlocking characteristics can be used with more than 1,5 mm of growth. 1,5 mm was chosen to represent maximum acceptable wear for a range of different interlocking paver shapes, including the rectangular paver used for these comparisons. */ El desgaste de los moldes causa un aumento generalizado del tamaño de los adoquines. Algunas formas, debido a sus caracteristicas de trabazón, se pueden utilizar con aumentos de más de 1,5 mm. 1,5 mm fue escogida como la dimensión para representar el desgaste máximo aceptable para un rango amplio de formas de adoquines, incluyendo el adoquín rectangular utilizado para estas comparaciones.*

[5] Cycle times are dependent on mechanical functions of the machines but also on raw material selection, quality requirements, mixing and batching restrictions, cubing and post-production handling restrictions, etc. Because of these variables, the cycle times listed can vary by as much as ±20%. */ La duración del ciclo depende de las funciones mecánicas de las máquinas y de la selección de las materias primas, los requisitos de calidad, las restricciones sobre dosificación y mezclado, y las de encubado y manejo de postproducción, etc. Debido a esas variables, la duración del ciclo incluidas, pueden variar en ± 20 %.*

[6] Approximate U.S.A. prices, in US $, at the time this document was written. There are a many paver mold suppliers around the world with varying price offerings so the prices listed may vary by as much as ± 20 % due to competitive pressure, currency exchange fluctuations, etc. */ Precio aproximado en US$ al escribir esta ponencia. Existen muchos proveedores de moldes alrededor del mundo con diversas ofertas de precios de manera que los precios incluidos pueden variar hasta en ± 20 %. Debido a la presión de la competencia, las fluctuaciones en los cambios de moneda, etc.*

Table 1. Cost study for molds in small and large pallet machines.
Tabla 1. *Estudio de costos para los moldes en máquinas de bandeja pequeña o grande.*

MACHINES CAPACITY *CAPACIDAD DE LA MÁQUINA*	PALLET SIZE *TAMAÑO DE LA BANDEJA* (mm)	DWELLING *VIVIENDA* (m^2)	# EQUIVALENT BLOCKS *# DE BLOQUES EQUIV.* 200 x 200 x 400 (mm)	BLOCK PRODUCTION *PRODUCCIÓN DE BLOQUES* (h)	PAVEMENT AREA *ÁREA DE PAVIMENTO* (m^2)	PAVERS ADOQUINES 100 x 200 (mm)	PAVER PRODUCTION *PRODUCCIÓN DE ADOQUINES* (h)	TOTAL PRODUCTION *PRODUCCIÓN TOTAL* (h)	DWELLINGS PER YEAR [1] *VIVIENDAS EN EL AÑO* (TOTAL #)
2-Block *2 Bloques*	457 x 940	144	2 300	2,4	40	2 000	0,6	3,0	669
3-Block *3 Bloques*	470 x 660	144	2 300	1,6	40	2 000	0,4	2,0	1 003
4-Block *4 Bloques*	470 x 940	144	2 300	1,2	40	2 000	0,3	1,5	1 337

[1] Calculated using 8h/d and 250 d/year. / *Calculada usando 8 h/d y 250 d/año.*

Table 3. Capacity of 2, 3 and 4-block machines to produce dwellings made with concrete products.
Tabla 3. *Capacidad de las máquinas bloqueras de 2, 3 y 4 bloques, para producir viviendas hechas con productos de concreto.*

PRODUCCIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO EN MÁQUINAS, DE BANDEJA PEQUEÑA, PARA LA PRODUCCIÓN DE BLOQUES [3] [4]

Greg K. PAGE
Director de Tecnología de Moldes
COLUMBIA MACHINE INC.
Vancouver, WA, E.U.A.

RESUMEN

Los adoquines o unidades segmentadas de concreto se usan en todo el mundo como medio de pavimentación para aplicaciones peatonales y vehiculares. Esos productos son producidos, generalmente, en máquinas diseñadas para tal fin, con una capacidad de producción de 0,65 m^2 hasta 1,4 m^2, como máximo, de adoquines de concreto por ciclo. Esas máquinas están limitadas en sus habilidades para producir otros productos de concreto como bloques para construcción (mampostería). Generalmente operan dentro del rango de altura de producto entre 50 mm y 100 mm. Algunas usan para bandejas planas de madera o de acero, aún durante el ciclo de curado, y algunas utilizan bandejas de producción en la máquina, retirando el producto de la bandeja inmediatamente después del desmoldado del mismo.

Aunque los fabricantes de esas máquinas las comercializan como máquinas de propósito múltiple, capaces de producir una amplio rango de productos de mampostería, su aplicación más común en la mayoría de los mercados, alrededor del mundo, es para productos segmentados para pavimentos. Para facilitar esta presentación, dicho tipo de máquinas de bandejas grandes serán referidas como máquinas "adoquineras".

Las máquinas automáticas para la producción de bloques son más comunes en todo el mundo. Las primeras máquinas de este tipo fueron producidas hace más de cien años, y ahora se fabrican en Europa, Japón, Corea y en los Estados Unidos (Máquinas pequeñas y en diferentes grados de automatización se fabrican, al menos, en México, Colombia, Argentina y Suráfrica). Dichas máquinas están diseñadas para hacer unidades de mampostería, huecas o macizas (bloques o ladrillos) con un módulo de 200 mm x 200 mm x 400 mm, pero con frecuencia se producen unidades de hasta 300 mm de alto y 500 mm de largo.

Aunque los fabricantes de esas máquinas las mercadean como máquinas de propósito múltiple, capaces de fabricar un amplio rango de productos de mampostería, su uso más común, en la mayoría de los mercados, alrededor del mundo, es la producción de bloques de concreto. Por lo tanto, para facilitar esta presentación, dicho tipo de máquinas será referido como máquinas "bloqueras".

Si bien estas máquinas usan diferentes grados de automatización para recibir la materia prima en la máquina y para remover y curar los productos "verdes" (no curados), el proceso básico de producción para todas las máquinas es el mismo y además, fundamentalmente el mismo que para las máquinas adoquineras.

El material se lleva al área del molde mediante un

[3] The editors used the International System of Units (SI) in this book of Proceedings, and the comma "," as the Decimal Marker. Each paper is presented first in English and then in Spanish, with the Tables and Figures, in both languages, placed in between.

[4] This is the original version of this paper.

cajón alimentador de desplazamiento horizontal, el cual deja caer el material dentro del molde por acción de la gravedad, agitación y vibración. El molde tiene paredes verticales sólidas pero está abierto por los planos horizontales de arriba y abajo. El plano horizontal inferior está cerrado por una bandeja removible de acero o de madera.

Cuando suficiente material ha sido alimentado dentro del molde, se retrae el cajón alimentador y el material se vibra con el fin de que consolide, densifique y se distribuya uniformemente a través de las cavidades del molde. Un juego de pisones compacta el material desde arriba, hasta alcanzar la altura de acabado.

En este momento el producto está terminado y debe ser removido del molde. Para hacer esto, el producto y la bandeja se desplazan hacia abajo del molde hasta que quedan libres y separados del plano inferior del molde. En otros equipos la bandeja y el producto se dejan en posición y el molde se desplaza hacia arriba hasta que deja libre al producto. En ambos casos, una vez el producto queda libre del molde, se puede transportar fuera de la máquina sobre su bandeja de manera que una nueva bandeja se pueda insertar y el proceso se pueda repetir.

Esas máquinas están diseñadas, primariamente, para productos con alturas entre 100 mm y 300 mm, con la mayoría de la producción hecha en el rango cercano a los 200 mm. Los ciclos de dichas máquinas pueden ser de tan solo 6 s, pero corrientemente están en el rango entre 8 s y 10 s.

La producción típica por ciclo para estos equipos puede estar entre 0,13 m^2 y 0,55 m^2. Las más grandes están en el rango de 0,78 m^2. Puesto que estas máquinas producen corrientemente bloques de concreto de 200 mm x 200 mm x 400 mm como módulo, sus productores con frecuencia se refieren a ellas, en función de su capacidad, como máquinas de 1 bloque, 2 bloques, 3 bloques, etc. Para facilitar esta presentación, se estará hablando de máquinas bloqueras de 2, 3 y 4 bloques. Se consiguen máquinas automáticas de 1 bloque pero rara vez se usan. Los tamaños más comunes de bandejas para máquinas de 2 y 3 bloques son:

- 457 mm x 508 mm (18x20") 2 bloques.
- 470 mm x 660 mm (18-1/2x26") 3 bloques.
- 470 mm x 940 mm (18-1/2x37") 4 bloques.

Esas bandejas son usualmente de acero y tienen generalmente un espesor de 6 mm a 10 mm (5/16" a 3/8").

Para facilitar esta presentación, las máquinas de estas dimensiones serán designadas como bloqueras de bandeja pequeña. Esta ponencia discutirá la factibilidad, ventajas y desventajas de producir adoquines de concreto en máquinas de bandeja pequeña.

1. HISTORIA

Los pavimentos segmentados, usando bloques de piedra, tienen miles de años de antigüedad, y muchos ejemplos tempranos sobreviven hoy. La pavimentación con adoquines manufacturados comenzó en Europa hace 300 años, pero las máquinas adoquineras de ciclo automático, de alta capacidad, no aparecieron hasta después de la Segunda Guerra Mundial. Esas máquinas fueron, y continúan siendo, construidas principalmente en Alemania. En los años 60s y 70s, los adoquines de concreto ganaron un gran nicho de mercado en Europa y esto hizo que se tuvieran disponibles máquinas especializadas en la producción de adoquines, provenientes, al menos, de cinco productores Alemanes. Mucha de la tecnología actual para la pavimentación con adoquines de concreto se desarrolló allá en esa época y todavía sigue vigente.

A medida que el mercado y la tecnología maduraron en Europa, se comenzó a regar por todo el mundo. Los arquitectos, paisajistas, contratistas y propietarios de vivienda en Australia, Nueva Zelandia, Suráfrica, los Estados Unidos, Canadá y Latinoamérica comenzaron a pedir este tipo de pavimento. Pero los productores de unidades de mampostería de ese entonces no estaban muy dispuestos a invertir en equipo cuando el mercado era todavía tan pequeño. Fue así como unos productores de bloques comenzaron a experimentar con la producción de adoquines en sus máquinas para hacer bloques, a comienzos de los años 70.

Los resultados fueron diversos. Los productores de bloque casi nunca habían producido ningún producto de menos de 90 mm de altura, ni nada que requiriera tan altas resistencias a la compresión. Se requerían entonces alturas de 60 mm y 80 mm, con resistencias a la compresión de 55 MPa (8 000 psi). Las relaciones agua/cemento eran muy distintas. Muchos agregados que funcionaban bien para unidades de mampostería portantes eran totalmente inadecuados para adoquines de concreto.

Los bordes biselados alrededor de la cara superior de los adoquines son un requisito de la mayoría de los modelos de adoquines, pero las máquinas bloqueras no trabajaban bien con dichos biseles. Cuando los adoquines se desmoldaban y las zapatas de compresión se retiraban de la cara superior, se creaba un vacío y se pegaba la mezcla. Como consecuencia se quedaban adheridos a las zapatas, pedazos de la cara superior del adoquín, y esto se iba acumulado, lo que originaba deterioro de aspecto estético.

Los productores alemanes de máquinas adoquineras habían solucionado antes este problema, con sistemas que aplicaban vibración a las caras superior e inferior, pisones y bandeja de la máquina. Con esto las zapatas se retiraban de la cara superior de los adoquines sin desprender la mezcla. De esta manera se fabricaban adoquines con superficie tersa.

Por otro lado, los diseñadores de máquinas bloqueras se tenían que acomodar a productos mucho más

altos, la mayoría de ellos de 200 mm a 250 mm, y el vibrar desde las caras superior e inferior no era efectivo para ese tipo de producto. Sus máquinas vibraban el molde directamente, sin aplicar vibración directa a la viga de compresión o a la bandeja. Ésta fue considerada como al mejor técnica de vibración para productos altos pero creaba un problema con adoquines biselados.

Los experimentos tempranos ensayaron numerosas tecnologías en un intento para eliminar la adherencia de los adoquines en sus máquinas bloqueras. Se disminuyeron los porcentajes de agua, pero las resistencias cayeron debido a la hidratación incompleta del cemento. Se agregaron aditivos pero sólo se lograron pequeñas mejoras. Se hizo aspersión sobre las zapatas antes de la compactación pero esto creó un ambiente desagradable alrededor de la máquina y la tendencia a la decoloración de los adoquines.

El calentamiento de las zapatas de compresión se intentó por muy diversos medios, con lo cual se logró una mejora inmediata. De hecho, la adhesión de la mezcla se eliminaba completamente siempre y cuando el calor se pudiera aplicar de manera consistente. Pero tomó años el perfeccionar sistemas de calentamiento de las zapatas que pudieran resistir el ambiente violento y sucio en el cual operan las zapatas de compresión de una máquina bloquera. Las conexiones eléctricas típicas fallaron debido a al vibración y a la suciedad en el aire. Los cables aislados convencionales fallaron por las mismas razones, además de las altas temperaturas.

Se ensayó con elementos de calentamiento de diversas formas: lineales, anillos, discos y cartuchos. La confiabilidad fue siempre el problema puesto que dichos elementos dependían, para generar el calor, de resistencias pasando a través de espirales de alambre de diámetros pequeños, las cuales siempre se destruían por la vibración.

La experimentación con estas tecnologías se adelantó durante unos cinco años. Se desarrollaron tecnologías adecuadas para los cableados. Los pisones se diseñaron de tal manera que tuvieran todo el cableado incorporado dentro de ellas, aislado y sellado del medio destructivo de la planta de producción.

Cuando se agotó la experimentación con todos los medio comerciales disponibles para la producción de calor, se desarrollaron elementos expresamente para dicha aplicación. Y fueron tan exitosos que inmediatamente se convirtieron la norma de la industria.

También se desarrollaron controladores de temperatura. Inicialmente fueron controladores de tiempo que prendía y apagaban los elementos productores de calor, por períodos de tiempo. Luego se desarrollaron controles activados térmicamente, lo que permite tener siempre la misma temperatura durante la producción.

En la actualidad, con el desarrollo de sistemas de calentamiento confiables, ha avanzado y se ha refinado el sistema de diseño de los moldes. Los productores de moldes tuvieron problemas con el sobrealto de los moldes. El sobrealto es la distancia que va desde el nivel terminado de los productos hasta la parte superior del molde. Ésta distancia usualmente era diferente en todos los productores pues no se habían optimizado todas las otras variables de producción. Un cliente podía que consolidara el material en el molde con la suficiente efectividad durante la vibración, de manera que sólo necesitara una pequeña cantidad de compactación con los pisones. Esos productos necesitaban tan solo un 5 % de sobrealto del molde. Pero el próximo cliente dependía menos de la vibración y más de la compactación para alcanzar la altura de acabado. Dicho tipo de clientes querían tener dos o tres veces el sobrealto que lo que quería el otro productor.

Pero después de algunos años de experimentación independiente por parte de los productores de equipos, se encontró el más exitoso proceso de producción y se documentó suficientemente por parte de productores de moldes y máquinas bloqueras. En ese entonces comenzaron a aparecer los requisitos para agregados gruesos, arenas, cementos y aditivos. Dichos requisitos eran, en algunos casos, muy diferentes a los usados para la fabricación de bloques convencionales. A medida que se refinó la selección de las materias primas, y el afinamiento de las máquina se entendió, se hizo posible obtener los requerimientos de resistencia y absorción con estándares universales y productos elaborados en máquinas adoquineras.

Dado que las bloqueras se diseñaron para producir bloques mediante el uso fundamental de vibración, no de tremendas fuerzas de compresión. Dicho proceso eventualmente se convirtió en el estándar para la producción de adoquines en esas máquinas. El tema del sobrealto del molde fue resuelto en ese entonces usando sobrealtos menores que en las máquinas adoquineras.

La tecnología para las rejillas de los moldes para adoquines en máquinas adoquineras se desarrolló por muy diversos caminos. Las rejillas eran cortadas con llama y acabadas a mano; maquinadas a partir de un bloque sólido; elaboradas a partir de pequeños elementos soldados unos con otros; y también se utilizó la fundición.

A la postre el método más eficiente en costos fue el corte con llama, y éste se ha convertido en la norma de la industria. En dicho proceso se utilizan aleaciones de acero que se han endurecido previamente, aceros que se endurecen durante el proceso de corte con llama y/o aceros que se pueden endurecer después de cortados. Los productores de moldes para adoquines que se especializan en moldes para máquinas adoquineras con bandejas grandes, han desarrollado técnicas de corte con llama muy avanzadas que son excepcionalmente precisas compa-

radas con las tecnologías de corte con llama de común ocurrencia.

Como se mencionó antes, las máquinas adoquineras no necesitaban el calentamiento de la zapatas de compresión para trabajar de manera confiable y eficiente. Pero la tecnología del calentamiento de las zapatas también evolucionó para estas máquinas. Se han producido zapatas estampadas o forjadas, vaciadas o maquinadas de bloques sólidos.

Los productores de moldes para bloques entraron en el negocio de los moldes para adoquines desde una perspectiva diferente. Sus moldes para bloques necesitaban ser muy exactos en sus dimensiones, durar mucho tiempo y tener partes desgastables que fueran reemplazables. La presión del mercado por moldes más y más durables empujó a la industria a aceptar un estándar de moldes conformados por piezas de desgaste endurecidas y reemplazables, que se ajustaban dentro de una caja fija. Ésta tecnología de moldes fue la norma antes de 1950 y continúa siéndolo hoy en día, con algunas mejoras.

Los productores de moldes para bloques también experimentaron con rejillas para moldes de adoquines fabricadas o vaciadas; pero desde muy temprano se centraron casi que exclusivamente en rejillas maquinadas de bloques sólidos. Dicha decisión fue influida por tres factores importantes:

- Primero, las máquinas bloqueras vibraban el molde mismo, casi que exclusivamente. Esto significaba más fuerza aplicada al molde que en las máquinas adoquineras que agitan la bandeja y las zapatas de compresión.
- Segundo, las tecnologías de producción empleadas por los fabricantes de moldes para bloques no tenían las habilidades necesarias para cortar a mano, pulir y ajustar rejillas fabricadas, fundidas o cortadas con llama. Se sentían mucho más a gusto con el maquinado a tolerancias estrictas requeridas en sus moldes para bloques con partes de desgaste reemplazables.
- Por último, dado que la tecnología de producción de moldes todavía incluía el endurecimiento, los fabricantes de moldes para bloques todavía querían tratar con calor dichos moldes. Ésto fue un ajuste de la tecnología que se dio de manera natural y contribuyó ampliamente a hacer la producción de adoquines en máquinas bloqueras, una alternativa económicamente viable al compararla con las máquinas adoquineras.

2. REJILLAS TRATADAS CON CALOR

Aunque el tratamiento con calor fue la opción inmediata de todos los productores de moldes para bloques al producir sus moldes para adoquines, no tuvo un éxito inmediato. El tratar con calor una rejilla de un molde para adoquines, que posee una masa perimetral grande, múltiples huecos en el medio y una gran cantidad de láminas de poca sección, representó un esfuerzo para el proceso tradicional de tratamiento con calor.

La tecnología común que obtiene resultados compatibles con los de la producción de moldes para bloques se llama carburación. Éste es un proceso de endurecimiento superficial que puede dar una piel o cáscara de 2 mm de espesor en la superficie de la pieza endurecida, con una dureza en rango Rc55-65. Ésta es la misma dureza de una broca para perforar aceros normales. Los aceros convencionales se pueden carburar con resultados decentes, pero se dispone de aleaciones de acero que mejoran los resultados, obteniendo las durezas más altas, los espesores de piel mayores y la mayor consistencia posible en el proceso. El proceso de carburación es tan popular y universalmente disponible alrededor del mundo que dichas aleaciones se consiguen fácilmente por doquier.

El proceso de carburación usualmente incorpora el bañado de la parte endurecible, a muy altas temperaturas, en una atmósfera rica en carbono, y luego, de manera súbita, el apagado en un baño de aceite. Cuando este proceso se usa en placas relativamente delgadas como las que comúnmente se usan para fabricar moldes para bloques, usualmente ocurre algún tipo de distorsión. Pero dado que el núcleo de las piezas carburadas permanece relativamente blando y maleable, las partes endurecidas usualmente se pueden enderezar, si es necesario, después del tratamiento con calor.

Las rejillas de los moldes para adoquines están sujetas aún a una mayor distorsión que las piezas de moldes para bloques debido a su forma y a la distribución de la masa. Y su forma hace virtualmente imposible enderezarlas después de tratarlas con calor. De manera que los fabricantes de moldes tuvieron que encontrar nuevos métodos y trucos para poder usar la carburación para sus rejillas para moldes de adoquines. Ellos tuvieron éxito de tal manera que han sido capaces de carburar rejillas de hasta 700 mm x 1,4 m.

Las rejillas y las zapatas carburizadas para máquinas bloqueras de bandeja pequeña usualmente dan un rendimiento mínimo de 100 000 ciclos de la máquina, y usualmente 200 000 ciclos, antes de desgastarse hasta el punto de deber ser reemplazadas. Ésto puede ser 2 o 3 veces la vida de un molde cortado con llama en una máquina adoquinera. De manera que aunque el precio de los moldes por cavidad elaborados de esta manera puede ser de 2 a 3 veces mayor que para un molde de una máquina adoquinera, el costo del molde por adoquín, aunque usualmente mayor, puede ser competitivo con los de las máquinas adoquineras (ver Tabla 1).

3. UNIFORMIDAD, PRECISIÓN Y CONTROL DE ALTURA

Los adoquines necesitan tener consistencia en su densidad, altura y tamaño en cada ciclo, y de ciclo en ciclo. El llenado durante el ciclo de producción es el componente clave para la uniformidad.

Como se describió antes, el llenado en máquinas adoquineras y bloqueras depende de un cajón alimentador si fondo, que usa la gravedad con agitación y vibración para llenar las cavidades del molde a medida de que el cajón avanza sobre el molde y luego de regresa para colocarse de nuevo dentro de la máquina. A medida que el cajón viaja en su ruta hacia adelante y hacia atrás, el nivel de la mezcla que contiene desciende, de manera que la masa del material que cae decrece constantemente. Puesto que el cajón se desplaza horizontalmente, también actúan fuerzas horizontales sobre la masa de la mezcla, lo cual se magnifica cuando la totalidad de la masa tiene que detenerse y cambiar de dirección.

Debido a estos problemas, es muy difícil obtener exactamente la misma cantidad de material distribuido uniformemente a través del área de producción del molde. Con frecuencia, existen diferencias de lado a lado pero, de manera especial, entre adelante y atrás. El problema del llenado adelante y atrás es un problema lineal (mientras más largo el recorrido, o sea más profunda la bandeja, más grande será el problema). Es aquí donde una bandeja más corta en el sentido del desplazamiento (adelante – atrás – adelante) puede tener una ventaja real.

Cuando la dimensión adelante – atrás sobrepasa los 500 mm, usualmente las máquinas están obligadas a sobrellenar algunas de las celdas con el fin de acomodar la cantidad mínima de material en algunas de ellas. Luego la máquina tiene que realizar la mayor parte del trabajo durante la compactación. Con bandejas con dimensiones de menos de 500 mm, las diferencias en la densidad entre adelante y atrás es tan pequeña que la mayor parte de la densificación y consolidación se puede hacer con vibración, no con compactación. Ésto hace que los adoquines tengan una densidad más uniforme y que sean más consistentes como producto final. Se puede asumir que al comparar dos adoquines de igual peso, el que tenga una densidad uniforme de arriba a abajo, en su espesor, tendrá una resistencia a la compresión y a la flexión mayor que la del adoquín que sea más denso en la parte superior y/o inferior que en el centro.

Dado que las máquinas bloqueras de bandeja pequeña pueden densificar principalmente por vibración, se mejora el control de altura y de consistencia. Se puede lograr, con frecuencia, una tolerancia de ± 0,5 mm con dichas máquinas. Por esto, los adoquines producidos en este tipo de máquinas tendrán una ventaja de mercadeo debido a que los colocadores desean siempre que todos los adoquines tengan la misma altura. Y puesto que la mayoría de los mercados tienen unas tolerancias entre 2 mm y 5 mm, los productores con bandejas pequeñas pueden, con frecuencia, producir ajustados al rango inferior de la tolerancia, ahorrándose hasta un 8 % en el material.

Otra ventaja obvia es el tiempo del ciclo de la máquina. La distancia más corta que tiene que recorrer el cajón alimentador es la mayor contribución a poder tener ciclos de máquina más rápidos en máquinas bloqueras de bandeja pequeña. Nótese la comparación de la duración de ciclos en la Tabla 1.

Las mejoras en la exactitud de la altura y la forma de los adoquines producidos en máquinas bloqueras de bandeja pequeña, pueden ser de gran beneficio durante la colocación mecanizada de adoquines. Dichas máquinas amordazan un rectángulo de adoquines en el sentido de ambos ejes horizontales, levantan dicho rectángulo y lo descargan en su posición final. Si los adoquines tienen inexactitudes en sus formas, algunos adoquines se caerán de dentro del rectángulo cuando son amordazados.

En la instalación de los adoquines durante la construcción reciente del aeropuerto de Hong Kong, se escogió una máquina productora de bloques para elaborar los adoquines debido, entre otras consideraciones, a que se podían garantizar las tolerancias necesarias y la excepcional repetibilidad de los adoquines despachados.

Otra ventaja del llenado más consistente logrado con alimentadores de recorrido más corto es el poder hace adoquines muy delgados. La mayoría de las máquinas adoquineras colocan en sus especificaciones 50 mm como el alto mínimo de producción. En algunas de ellas se pueden lograr 40 mm, pero ese es el límite práctico.

Las máquinas bloqueras de bandeja pequeña pueden producir fácilmente en alturas de 40 mm y en 25 mm se hace con regularidad; 22 mm se ha alcanzado con éxito, pero se considera que 25 mm es el límite práctico.

Los adoquines delgados, de menos de 60 mm de espesor, son un mercado creciente, en muchas regiones del mundo, para tráfico no vehicular, pavimentos para cargas bajas y para sobrecapas de pavimentos existentes. En este momento, dicho tipo de máquinas es la única opción para los adoquines más delgados.

4. COSTO DE LOS MOLDES

Los productores miden el costo de los moldes de diferentes maneras. En este caso, los costos de los moldes se calculan como el costo inicial (de compra, sin incluir despacho, impuestos, etc.) dividido por el número total de adoquines producidos con él. Éste es referido como el "costo del molde por adoquín". Como ya se mencionó anteriormente, los productores de moldes para las máquinas bloqueras de bandeja pequeña, labran las cavidades de los adoquines de una placa maciza de acero. Con las máquinas controladas por computador, disponibles hoy en día, la exactitud y la repetibilidad de las formas de las cavidades es extremadamente alta. Ésto tiene un efecto significativo en los costos de los moldes si un productor de adoquines necesita fabricar el producto en dos alturas. En aplicaciones como esta, por ejemplo al hacer adoquines de 60 mm y 80 mm de espesor, el productor puede comprar dos rejillas,

para 60 mm y para 80 mm, y usar el mismo juego de pisones y zapatas de manera alterna con ambas rejillas.

Esto también tiene validez para el reemplazo de rejillas y zapatas. Un productor de adoquines en una bloquera puede ordenar una rejilla y zapatas de repuesto, pudiendo utilizar el mismo juego de pisones. Los moldes de repuesto para máquinas adoquineras se suministran casi que exclusivamente como ensambles completos, incluyendo un juego nuevo de pisones, debido a que el reemplazo de las cavidades o de las zapatas no es, generalmente, lo suficientemente exacto.

Aunque los costos iniciales de los moldes (por adoquín) para adoquines producidos en máquinas bloqueras son, con frecuencia, más altos (ver Tabla 1), la intercambiabilidad de los elementos pueden reducir el costo efectivo a lo largo de un período de tiempo. Como ejemplo (ver Tabla 2), una máquina bloquera de bandeja de 470 mm x 660 mm puede tener un costo inicial para un molde de US$ 0,007 por adoquín que es un 30 % más alto que el de algunas máquinas adoquineras de bandeja grande. Sin embargo, después de la tercera reconstrucción del molde, el costo efectivo se reduce a US$ 0,005 con lo que se iguala al de las máquinas adoquineras mencionadas.

5. COSTO DE LAS MATERIAS PRIMAS

Las máquinas bloqueras que producen adoquines usan los mismos agregados y cemento que las máquinas adoquineras. Con las variaciones en las densidades que se pueden tener con una máquina con recorrido de cajón alimentador largos, los productores con máquinas adoquineras de bandeja grande incrementan la cantidad de cemento, algunas veces, para asegurar un mínimo de resistencia y densidad para todos los adoquines de un mismo ciclo. Sin embargo, si se mejora la consistencia en la densidad al producir adoquines en una máquina bloquera de bandeja pequeña, comparado con la producción en una máquina adoquinera de bandeja grande, como se explicó antes, los porcentajes de cemento se pueden reducir en la máquina bloquera en comparación con la de bandeja grande, conservando aún la resistencia y absorción necesarias.

6. FLEXIBILIDAD

Las máquinas adoquineras, tal y como se definieron anteriormente, pueden hacer bloques de concreto y otros muchos productos como unidades para muros de contención, bordillos, etc., y las máquinas bloqueras pueden hacer adoquines. Sería muy difícil argumentar que una máquina bloquera de bandeja pequeña es la máquina perfecta para el caso cuando se requiere sólo de adoquines. Las máquinas adoquineras son la respuesta obvia para dicha aplicación. Pero cuando se tienen mercados con demanda por bloques y adoquines, y la capacidad de una máquina bloquera de bandeja pequeña puede atender la demanda de ambos productos, dicha máquina puede ser la mejor solución.

Los mercados de bloques, incluyendo el de las unidades para muros de contención y otros productos para paisajismo, se están diversificando. El mercado de los bloque se de concreto se mueve constantemente de las unidades típicas a las que poseen valor agregado. Las superficies partidas o texturadas, las formas y dimensiones según la necesidad del cliente, diseños sismo-resistentes, sistemas sin mortero de pega, sistemas de unidades para muros de contención, etc., continúan creciendo en su participación del mercado mientras que las ventas del bloque plano común se mantiene o tienden a reducir su participación en el mismo mercado.

Aquí es donde la máquina bloquera se desempeña mejor. Fueron diseñadas y se han desarrollado a lo largo de los años para este tipo de producción flexible. Los moldes son muy pequeños, de 2 o 4 bloques por ciclo para este estudio, y tienen elementos cambiables de modo que los moldes se pueden reconfigurar para hacer diferentes productos con diversas características. No es extraño que una fábrica de bloques típica en Norteamérica, tenga 50 o más moldes en su inventario.

Ésto contrasta con las máquinas adoquineras que hacen 12 o, aún, 18 adoquines al tiempo. Sus moldes son grandes, complicados, y usualmente no se pueden modificar o adaptar fácilmente. Debido a su tamaño, son muy costosos y existen muy pocos productores con bandejas grandes que tengan más de 10 de esos moldes. La flexibilidad en la producción puede ser un problema. Los cambios rápidos para atender nuevos mercados o cambios en los existentes pueden ser difíciles. Y hacia allá es hacia donde se está dirigiendo la mampostería.

Debido a sus grandes velocidades de producción, de 2 a 4 bloques de 200 mm x 200 mm x 400 mm por ciclo y de 7 a 10 ciclos por minuto, las máquinas bloqueras de bandeja pequeña se pueden acomodar a la mayoría de los mercados urbanos. La producción de 12 o 18 bloques por ciclo puede ser demasiado par la mayoría de los mercados, a no ser que se esté en un área urbana muy grande. Si una mezcla de adoquines y bloques se ajusta al mercado, la máquina que mejor se puede acomodar a la producción es la bloquera de bandeja pequeña.

7. CAPACIDAD

La Tabla 3 muestra la capacidad, en términos de viviendas unifamiliares, de una máquina bloquera de bandeja pequeña, con una producción mixta de bloques y adoquines. Para efectos de comparación, se escogió una vivienda unifamiliar de 144 m2 de espacio habitable, con 40 m2 de superficie de adoquines (acceso peatonal, acceso vehicular, patio). Nótese que la capacidad de producción de una sola máquina bloquera de bandeja pequeña, trabajando un turno diario, es de 669 a 1 337 viviendas por año, dependiendo del tamaño de la máquina. Bajo condiciones normales de crecimiento, en un mercado

con el 50 % de la construcción nueva de vivienda en mampostería de concreto, esta producción atendería un mercado para una población entre 150 000 y 300 000 habitantes. Y esto está basado en un modelo netamente residencial. Los modelos mixtos con menos con menos construcción residencial y más comercial son más reales e iguales de prácticos en este tamaño de mercado. Una capacidad de producción adicional a esta es un desperdicio ne mercados de dicho tamaño, excepto en esos mercados donde la mampostería de concreto y los pavimentos de adoquines de concreto son los únicos materiales de construcción disponibles. Y esos mercados son poco frecuentes.

8. DESVENTAJAS DE LAS MÁQUINAS BLOQUERAS

Adicional a los límites de capacidad basados en el tamaño de las bandejas, la desventaja para la producción de adoquines en una máquina bloquera de bandeja pequeña es el cubicado y paletizado posterior a la producción. Las plantas de bandejas grandes, que solo producen adoquines, usualmente tienen sistemas de cubicado por vacío o por tenazas diseñados para cubicar capas delgadas con bordes irregulares. Y en muchos casos el tamaño del cubo de despacho es el mismo del área de producción del molde, de manera que los adoquines no se tienen que acumular para luego manipularlos para conformar cubos para el despacho.

Las plantas para bloques, por el otro lado, usualmente tienen máquinas de cubicado diseñadas fundamentalmente para productos más altos, con bordes paralelos y rectos, en otras palabras, bloques de concreto. Muchas formas de adoquines, como los rectangulares comunes o las formas cuadradas, funcionan bien con esos sistemas de cubicado. Pero algunas formas requieren modificaciones del sistema para que trabajen automáticamente. El mover adoquines de forma irregular empujándolos desde sus lados, para formar arrumes sobre estibas para el despacho, puede ser todo un desafío.

9. CONCLUSIONES

Las máquinas bloqueras de bandejas pequeñas son adecuadas para la producción de adoquines en aplicaciones mixtas donde se necesita producir adoquines y bloques en la misma línea de producción. Las limitaciones radican en la capacidad de producción y en el tamaño del mercado que es servido. Aunque la capacidad de producción de esas máquinas es limitada, la producción anual es suficiente para la demanda en una inmensa cantidad de mercados nuevos o existentes alrededor del mundo.

En un mercado de demanda mixta de tamaño moderado, donde se necesita suministrar adoquines y bloques, una máquina bloquera de bandeja pequeña se ajusta mejor para ambos productos que una máquina adoquinera de bandeja grande. La misma lógica se puede aplicar cuando se trata de producción especializada. En este caso la máquina adoquinera es la mejor solución para la producción de adoquines solamente, la bloquera para la producción de bloques solamente.