

## **Моделирование и симуляция флотации медно-молибденовых руд: работа с минералами**

**Мануэль Гонзалез**, Caspeo Chili,  
Сантьяго, Чили – [m.gonzalez@caspeo.net](mailto:m.gonzalez@caspeo.net); Моб: +56-9-5636-1547

**Стефан Брошо**, Caspeo,  
ул. Авеню Клода Гиймен, 3, а/я 36009, 45060, Орлеан Седекс 2, Франция

**Мари-Вероник Дюран**, Caspeo,  
ул. Авеню Клода Гиймен, 3, а/я 36009, 45060, Орлеан Седекс 2, Франция

### **АННОТАЦИЯ**

Одно из общепринятых утверждений металлургического сообщества гласит: «мы флотируем минералы, не металлы». Это правда, флотация основывается на поверхностных свойствах минералов. Проблема в том, что иногда мы забываем об этом, в особенности, когда говорим о моделировании и симуляции. В этом случае мы обычно работаем с металлами, такими, как медь или молибден. Первой причиной прямой работы с металлами является то, что в таком случае легче смоделировать систему. Второй – что не всегда просто получить данные, необходимые для более детального моделирования.

Сегодня ситуация значительно отличается, и среднестатистическая фабрика обладает более чем достаточным объемом данных для построения и использования симулятора процессов с очень подробной моделью материалов. Анализ гранулометрического распределения частиц, химического и минералогического состава проводится регулярно. Эти данные являются ключом к внедрению моделирования и симуляции в циклах флотации и дадут металлургам инструменты для понимания и оптимизации их процессов.

Настоящая статья описывает возможности интеграции минералогической информации в симулятор цикла флотации медно-молибденовых руд, вызовы такого подхода, а также его преимущества в части оптимизации процесса и прогнозирования производства концентрата с учетом геометаллургических данных.

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Флотация, моделирование, симуляция, медно-молибденовая руда, минералогия, геометаллургия

## ВВЕДЕНИЕ

Технологии пенной флотации более ста лет. В течение этого времени она значительно развивалась: размер камер флотации вырос экспоненциально, были разработаны новые реагенты, появились новые типы оборудования. Пенная флотация была и до сих пор является успешной поскольку позволяет эффективно и малозатратно обогащать руды с низкими содержаниями и комплексные руды (Gupta & Yan, 2016).

Сегодня горнорудная индустрия сталкивается с все более комплексными рудами. В силу такой комплексности оценить производительность процесса флотации не всегда просто. Инструменты для моделирования и симуляции (Brochet et al., 2006), геометаллургия всегда были подспорьем для технологов. Такие инструменты помогают понять и преодолеть сложные проблемы, с которыми инженеры сталкиваются на фабрике каждый день.

С развитием технологии флотации развивались и средства моделирования и симуляции. С помощью новых исследовательских инструментов, таких, как количественная минералогия, которые повышают точность результатов, сегодня как никогда просто работать с большими и комплексными схемами, с комплексными математическими моделями, которые точно воспроизводят поведение руд, с комплексными фазовыми моделями.

Настоящая статья описывает возможности интеграции минералогической информации в симулятор цикла флотации медно-молибденовых руд, вызовы такого подхода, а также его преимущества в части оптимизации процесса и прогнозирования производства концентрата с учетом геометаллургических данных.

## ПОСТРОЕНИЕ СИМУЛЯТОРА ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ

Симулятор процесса состоит из трех основных компонент: технологической схемы, фазовой модели и математических моделей операций.

Технологическая схема — это схематичное представление цикла флотации. Она включает ключевые этапы и основное оборудование процесса.

Математические модели — это комплексные алгоритмы, которые воспроизводят процесс, происходящий в оборудовании операции, в нашем случае – в камерах флотации (или в флотомашине). Модель флотации может быть простой, как функция извлечения компонент руды (уравнение 1), или сложной, как функция, учитывающая кинетику (уравнение 2), которая в свою очередь является функцией размера частиц (уравнение 3), для нескольких компонент руды (Caspero, 2018).

$$Q_{ci} = Q_{fi} \frac{R_i}{100} \quad (1)$$

$$Q_{cij} = Q_{fij} \times R_{\infty i} \times \left[ 1 - \frac{1}{1 + K_{ij} \times \tau} \right] \quad (2)$$

$$K_{ij} = \frac{a_i}{\sqrt{d_j}} \times \left[ 1 - \left( \frac{d_j}{d_{max i}} \right)^{1.5} \right] \times e^{-\left( \frac{d_{optim i}}{2 \times d_j} \right)^2} \quad (3)$$

где:

- $Q_{ci}$ : расход минерала  $i$  в пене
- $Q_{fi}$ : расход минерала  $i$  в питании
- $R_i$ : извлечение минерала  $i$  в пену
- $Q_{cij}$ : расход частиц типа  $i$  и класса крупности  $j$  в пене
- $Q_{fij}$ : расход частиц типа  $i$  и класса крупности  $j$  в питании
- $R_{oi}$ : максимальное возможное извлечение частиц типа  $i$  в пену
- $t$ : среднее время нахождения в камере флотации
- $K_{ij}$ : кинетическая константа частиц типа  $i$  и класса крупности  $j$
- $a_i$ : поправочный коэффициент
- $d_j$ : средний размер частиц в классе крупности  $j$
- $d_{max i}$ : размер самой крупной флотирующей частицы типа  $i$
- $d_{optim i}$ : размер самой легкой флотирующей частицы типа  $i$

Первую модель легко использовать, но информация, которую она может дать, не слишком ценная. Вторым подходом труднее в использовании поскольку требует больше знаний и данных, но дает значимую информацию (Brochot et al., 2010), которую инженеры могут использовать для оптимизации цикла флотации или прогнозирования его производительности с использованием геометаллургических данных (Gonzalez, Brochot & Durance, 2017).

При использовании последнего подхода становится возможным работать в рамках и минералов и металлов одновременно, а также в рамках размеров частиц. На первый взгляд такая фазовая модель выглядит сложной, на практике ее легко построить и использовать.

## ОПИСАНИЕ РУД: СОВМЕЩЕНИЕ МИНЕРАЛОВ И МЕТАЛЛОВ

Как указано выше, комплексный симулятор флотации требует соответствующего подробного описания руды. Фактически фазовая модель является одним из ключевых элементов такого симулятора. Комплексная фазовая модель должна уметь принимать во внимание и размеры частиц, и состав. В последнем случае возможно два различных подхода: металлы и минералы.

Еще несколько лет назад было практически невозможно описать руду в части минералов из-за недостатка информации. Сегодня большая часть современных предприятий обладает множеством минералогических данных, полученных или из геометаллургических исследований или из самого процесса. В силу наличия данных, минералогический подход может дать больше полезной информации и может быть легко переведен в металлы. Таблица 1 показывает формат описания руды в фазовой модели симулятора.

Таблица 1. Описание фазовой модели

|                 |                            |                          |                 |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|-----------------|
| Пульпа          | Руда                       | Медьсодержащий минерал 1 | Медь            |
|                 |                            |                          | Другие элементы |
|                 |                            | Медьсодержащий минерал 2 | Медь            |
|                 |                            |                          | Другие элементы |
|                 | Молибденсодержащий минерал | Молибден                 |                 |
| Другие элементы |                            |                          |                 |
|                 | Пустая порода              | Другие элементы          |                 |
|                 | Вода                       |                          |                 |

## ПРЕИМУЩЕСТВА КОМПЛЕКСНЫХ СИМУЛЯТОРОВ, ПОСТРОЕННЫХ С УЧЕТОМ ДАННЫХ МИНЕРАЛОГИИ

Комбинирование математических моделей операций и фазовой модели материала, описанных выше, дает ряд преимуществ. Первое и наиболее важное заключается в том, что такой симулятор позволяет воспроизвести реальный процесс пенной флотации, в рамках которой флотируют именно минералы (но не металлы). Второе – в том, что, принимая во внимание кинетику по типу частиц и классу крупности, становится возможным получить более точные результаты при изменении характеристик руды.

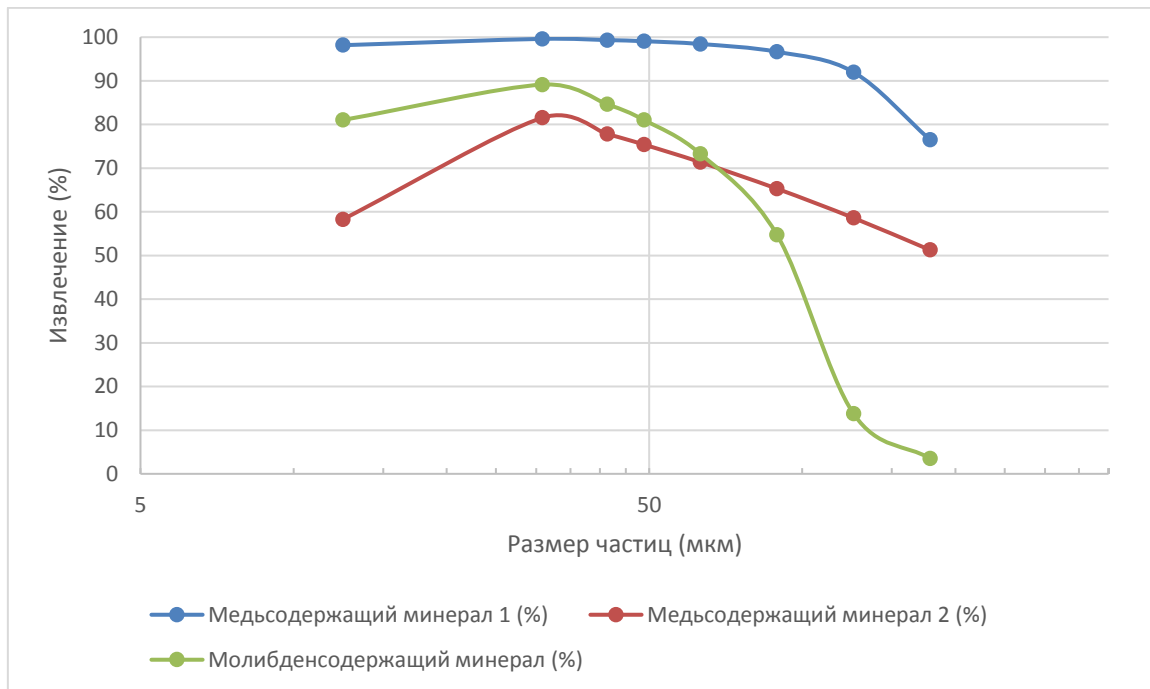


Рисунок 1. Протекание флотации для различных минералов

Рисунок 1 показывает пример извлечения трех минералов в флотомашине. Каждый из них ведет себя по-разному, и при этом для всех верно, что извлечение зависит от размеров. Это хороший пример преимущества минералогического подхода к моделированию процессов: он является более реалистичным и позволяет получить более достоверные результаты, что проиллюстрировано на следующем примере.

### ПРИМЕР: МЕДНО-МОЛИБДЕНОВАЯ ФЛОТАЦИЯ

Этот упрощенный пример иллюстрирует преимущества комплексного симулятора обогащительных процессов, в особенности при наличии пенной флотации. Схема показана на рисунке 2:

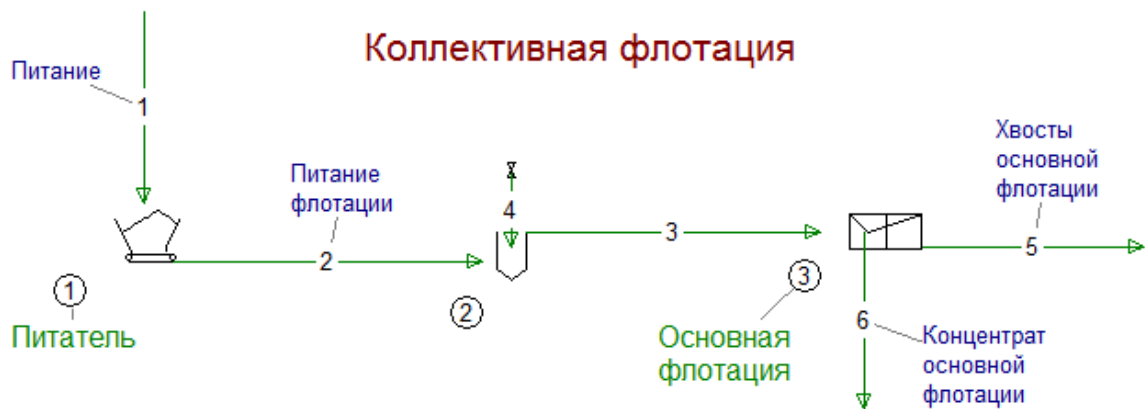


Рисунок 2. Схема симулятора процесса

Целью является оценка воздействия различных параметров секции основной флотации цикла флотации медно-молибденовых руд. Фазовая модель материала описывает руду в части минералов и металлов в соответствии с структурой, приведенной в таблице 1.

Модель секции включает питатель, регулятор плотности и флотомашину. Питатель представлен вспомогательной моделью, которая может изменять параметры расхода и гранулометрического распределения питания. Задачей регулятора плотности является сохранение оптимальной плотности пульпы в питании флотации. Математическая модель флотации основывается на кинетике процесса. Она включает кинетическую константу по каждому классу крупности для каждого минерала. Как ранее показано на рисунке 1, флотация различных медьсодержащих минералов протекает по-разному и зависит от размеров частиц.

Первый расчет, целью которого является оценка воздействия крупности питания флотации на металлургическую производительность, выполняется с использованием модуля Супервайзер, инструмента анализа чувствительности, встроенного в USIM PAC. Результаты показаны на рисунке 3:

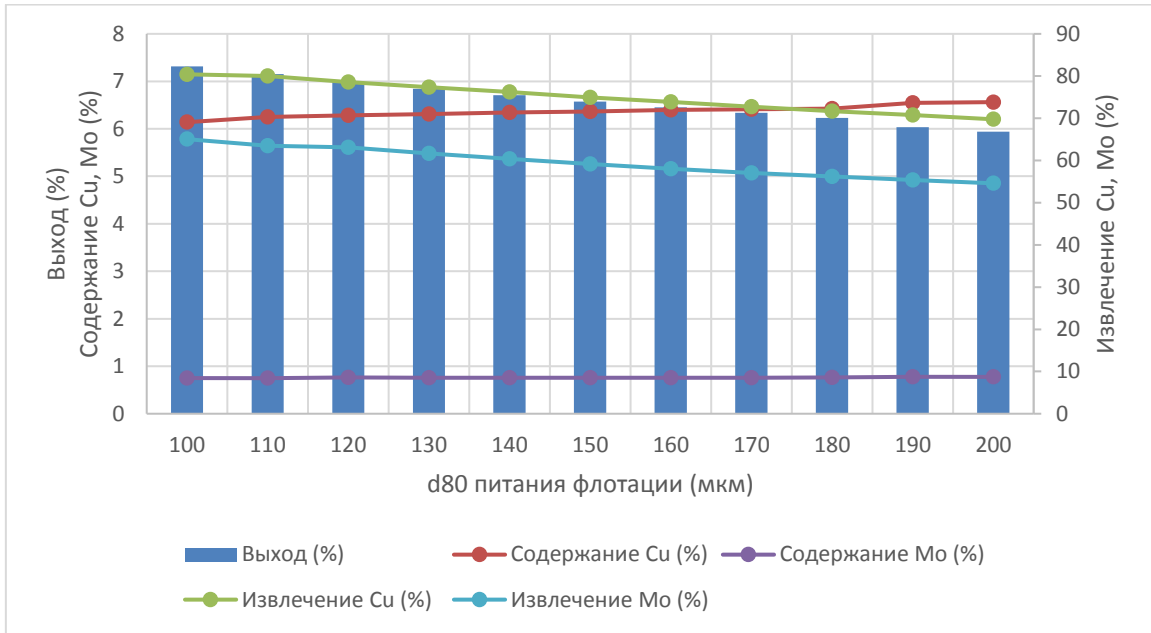


Рисунок 3. Результаты анализа чувствительности в части крупности питания флотации

Как описано выше, извлечение всех компонентов руды является функцией размера частиц. При слишком крупном питании флотации, выход и извлечение металлов снижаются. При этом, поскольку содержание пустой породы в пене также снижается, растут содержание меди и молибдена в концентрате.

Целью второго расчета является оценка воздействия расхода твердого на металлургическую производительность. Результаты показаны на рисунке 4:

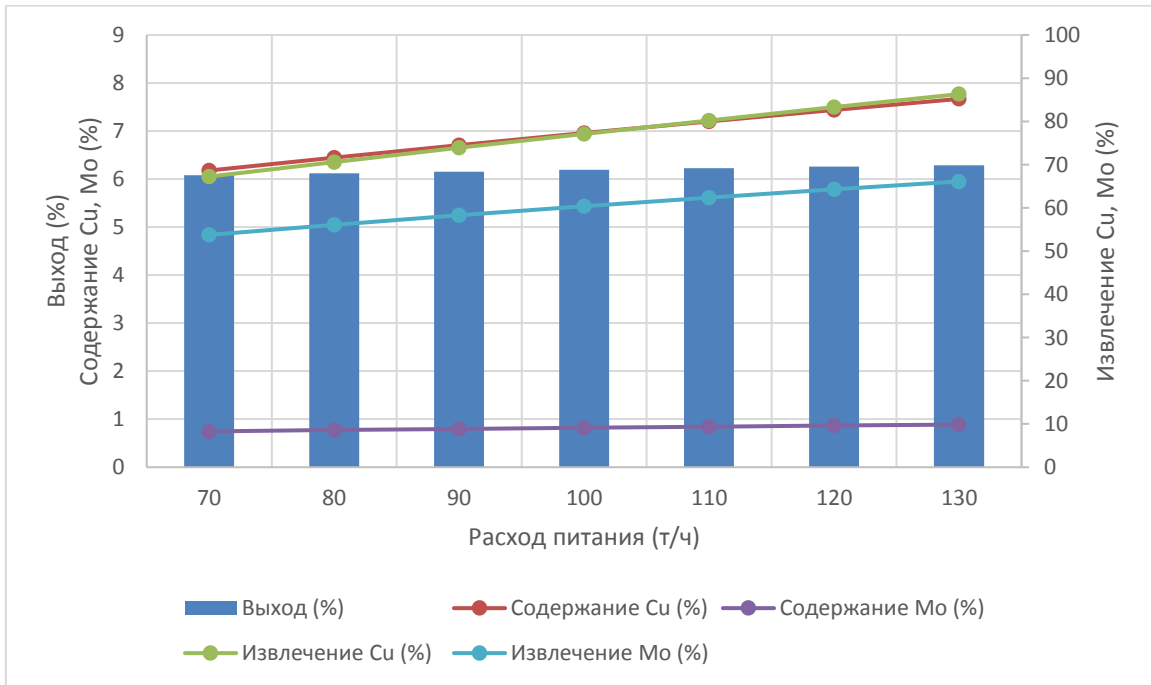


Рисунок 4. Результаты анализа чувствительности в части расхода питания флотации

Хотя изменение выхода незначительно, извлечения и содержания меди и молибдена в концентрате растут. Этот эффект объясняется увеличением частичных расходов ценных минералов и различным поведением компонентов руды: наиболее быстрая кинетика медьсодержащих и молибденсодержащих минералов перевешивает увеличение извлечения пустой породы.

Целью последней симуляции является оценка воздействия изменений характеристик питания на металлургическую производительность процесса. Тестировались два различных питания. Характеристики каждого обобщены в Таблице 2:

Таблица 2. Характеристики руды.

| Содержания       | Минерал с Cu 1 (%) | Минерал с Cu 2 (%) | Cu (%) |
|------------------|--------------------|--------------------|--------|
| Базовый сценарий | 0.4174             | 0.6506             | 0.5586 |
| Сценарий 1       | 0.3339             | 0.8392             | 0.5572 |
| Сценарий 2       | 0.4842             | 0.4944             | 0.5579 |

Целью расчетов в рамках последней симуляции является подтверждение того, что даже когда содержание меди остается приблизительно одинаковым, изменение в минералогическом составе руды может дать значительное различие в металлургической производительности цикла. Результаты расчетов по трем сценариям приведены на рисунке 5:

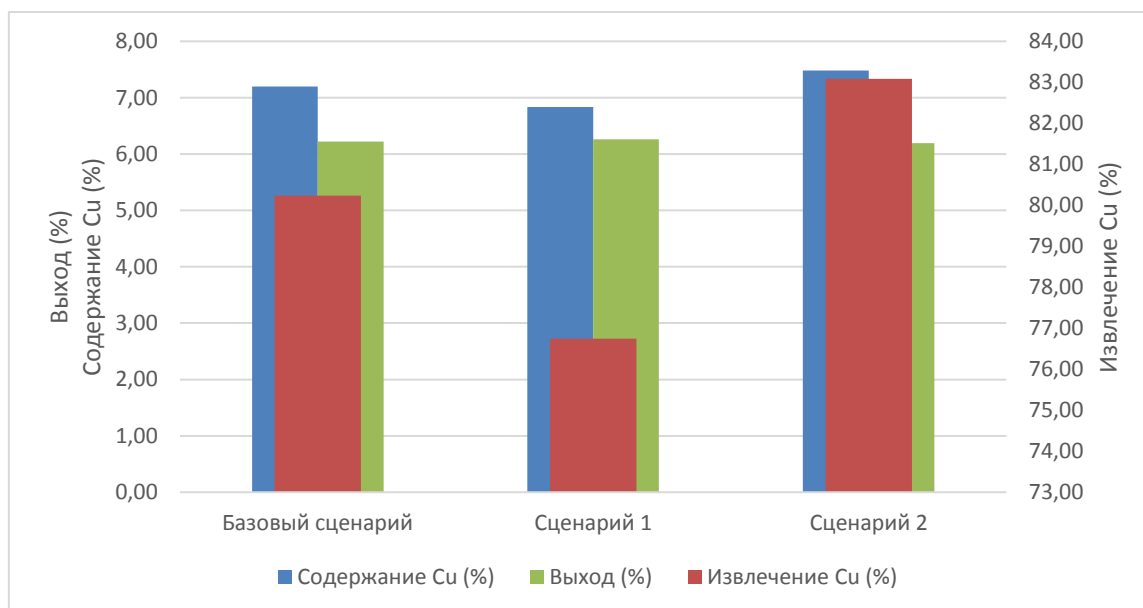


Рисунок 5. Выход, извлечение меди и содержание в концентрате для различных характеристик руды

Как показано на рисунке 1, флотация обоих медьсодержащих минералов протекает по-разному. Минерал 1 обладает более быстрой кинетикой в сравнении с Минералом 2. Если доля Минерала 1 увеличивается, при прочих равных условиях, извлечение и содержание в концентрате также увеличиваются по причине наиболее быстрой кинетики.

Вследствие приблизительно одинакового содержания меди, анализ применения в указанных трех сценариях симулятора, который учитывает только медь, приводит к пониманию того, что результаты расчета неправильные: симулятор всегда прогнозирует одинаковое извлечение и содержание меди в концентрате.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Сегодня инструменты для моделирования и симуляции широко используются в горнорудной индустрии, начиная с проектирования карьера, заканчивая оптимизацией цепочек поставок. Обогащение полезных ископаемых не является исключением. На рынке представлен ряд инструментов для моделирования, некоторые из которых обладают более чем тридцатилетним «стажем». Моделирование и расчет обогатительных процессов является непростой задачей, поэтому хороший симулятор должен включать не только качественные математические модели операций обогащения, но также должен принимать во внимание подробное описание руды. Последнее является самой важной перспективной характеристикой любого симулятора процессов, относящегося к горно-обогатительной индустрии.

Программный пакет USIM PAC, в котором был построен симулятор, использованный для расчетов при подготовке настоящей статьи, включает широкий набор математических моделей операций. Наиболее продвинутые из которых позволяют принять во внимание не только расход и размер частиц, но и минералогический состав руды, состав руды в части металлов, а также, при наличии, данные раскрытия минералов. Благодаря такой уникальной комбинации функциональности, данный программный пакет обладает хорошими возможностями для помощи инженерам металлургам в работе со все более комплексными рудами.

Все описанные расчеты (симуляции), в особенности те, в рамках которых путем принятия во внимание изменений в минералогии была возможна оценка металлургической производительности цикла на различных рудах, представленных в руднике, могут быть использованы как инструмент для прогнозирования производства различных продуктов и поиска решений для оптимизации процессов при падении производительности или при несоответствии продукции регламентам предприятия.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Brochot, S., Durance, M.-V., Botané, P., Cailleau, A., (2010) 'Modeling and Simulation to Design a Flotation Circuit for Gold Concentration', *Proceedings of the XXV International Mineral Processing Congress*, Brisbane, Australia, pp. 3151-3162.

Brochot, S., Wiegel, R.L., Ersayin, S., Touze, S., (2006) 'Modeling and Simulation of Comminution Circuits with USIM PAC', *Advances in Comminution*, Ed. S.K. Kawatra, SME, pp. 485-511.

Caspeo (2018) *USIM PAC Unit Operation Model Guide*, Caspeo, France

Gonzalez, M., Brochot, S., Durance, M.-V., (2017) 'Plant performance forecasting using geometallurgical data and advanced process simulation techniques', *Proceedings of the XII International Mineral Processing Congress*, Eds. Cruz, N., Doll, A., Godoy, S., Jerez, O., Johnston, A., Kuyvenhoven, R., Zanin, M., Chile, pp. 371-381.

Gupta, A., Yan, D., (2016) *Mineral Processing Design and Operations. An Introduction, 2<sup>nd</sup> Edition*, Elsevier, Amsterdam.